



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VYHODNOCENÍ PROVOZNÍHO STAVU
ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ JADERNÉ
ELEKTRÁRNY DUKOVANY METODOU FREKVENČNÍ
ANALÝZY STATOROVÉHO PROUDU**

EVALUATION OF THE OPERATING STATE OF ASYNCHRONOUS MOTORS OF THE DUKOVANY
NUCLEAR POWER PLANT BY THE METHOD OF FREQUENCY ANALYSIS OF STATOR CURRENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Libor Štěpanovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Libor Štěpanovský

ID: 191754

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vyhodnocení provozního stavu asynchronních motorů jaderné elektrárny Dukovany metodou frekvenční analýzy statorového proudu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Asynchronní motory důležitých soustrojí vlastní spotřeby jaderné elektrárny, jejich význam a parametry
2. Diagnostická metoda poruch a závad asynchronních motorů založená na principu frekvenční analýzy statorového proudu, její popis, princip a nasazení na elektrárně
3. Monitorovací systém elektro, stručný popis a využití, webové rozhraní
4. Tvorba databázového prostředí ve webovém rozhraní Monitorovacího systému elektro jaderné elektrárny pro možnost vizualizace a dlouhodobého sledování stavu asynchronních motorů včetně jejich trendů
5. Zhodnocení současného stavu asynchronních strojů důležitých soustrojí vlastní spotřeby posuzovaných metodou frekvenční analýzy statorového proudu
6. Návrh nastavení limit a kritérií pro výsledky frekvenční analýzy statorového proudu důležitých asynchronních motorů jaderné elektrárny
7. Návrh pravidelného hodnocení stavu asynchronních motorů sledovaných pomocí metody frekvenční analýzy statorového proudu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího diplomové práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá nastavením limit a kritérií, návrhem databázového prostředí a zhodnocením současného stavu motorů důležitých soustrojí vlastní spotřeby na Jaderné elektrárně Dukovany. V první části práce je stručný popis asynchronních motorů, vyhodnocovací metody a soupis sledovaných motorů vlastní spotřeby na Jaderné elektrárně Dukovany. Druhá část práce se věnuje návrhem limit a kritérií pro hodnocení stavů důležitých motorů a zhodnocení aktuálního stavu. Na závěr práce je zmíněn stručný popis monitorovacího systému elektro spolu s popisem vytvořeného databázového prostředí. V příloze diplomové práce je uveden návrh šablony protokolu pro vyhodnocení aktuálního stavu motoru a dále návrh šablony technické zprávy pro pravidelné roční hodnocení stavu asynchronních motorů s analýzou trendů vývoje sledovaných oblastí MCSA (Motor Current Signature Analysis).

Klíčová slova

Asynchronní motor, statorový proud, frekvenční analýza statorového proudu

Abstract

The masters thesis is concerned with the setting of limits and criteria, the design of database environment and the evaluation of the current state of motors of the important machines related to own consumption of the Nuclear power plant Dukovany. The first part of the thesis is a short description of induction motors, the evaluation method and the inventory of the observed motors related to own consumption of Nuclear power plant Dukovany. The second part of the thesis concerns the design of limits and criteria for evaluating the current state of these important motors. Finally, the thesis shows a short description of the electro monitoring system together with the description of the database environment created. In the supplementary materials of the thesis, there is a design of a protocol template for evaluation of the current state of the motor and a technical report template for regular evaluation in monitored areas MCSA (Motor Current Signature Analysis) of the state of the induction motors.

Keywords

Induction motor, stator current, Motor Current Signature Analysis

Bibliografická citace

ŠTĚPANOVSKÝ, Libor. Vyhodnocení provozního stavu asynchronních motorů jaderné elektrárny Dukovany metodou frekvenční analýzy statorového proudu. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134918>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Mastný.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Libor Štěpanovský
VUT ID studenta:	191754
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Vyhodnocení provozního stavu asynchronních motorů jaderné elektrárny Dukovany na základě prováděných diagnostických měření metodou frekvenční analýzy statorového proudu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora



Poskytnutí dokumentace EDU

Ing. Stanislav Nováček, VODB péče o zařízení JE Dukovany
a **Ing. Robert Peňák**, VO péče o zařízení elektro JE Dukovany
společnosti **ČEZ, a. s.**
se sídlem Praha 4, Duhová 2/1444, PSČ 14053, IČ: 45274649,

schvalují poskytnutí naměřených dat a dokumentů v oblasti vyvedení výkonu a blokové vlastní spotřeby Jaderné elektrárny Dukovany.
Dotčená data a dokumenty se poskytují panu Bc. Liborovi Štěpanovskému pouze pro účely vypracování a prezentace diplomové práce.

Bc. Libor Štěpanovský

bytem v Třebíči, I. Olbrachta 668/1,

datum narození 27.04.1997

prohlašuje, že příslušné dokumenty vlastněné společností ČEZ, a.s. budou použity pro vypracování a prezentaci diplomové práce a nebudou šířeny a poskytovány třetím stranám.

Dne:

.....
Vedoucí odboru 90E0DU200
Ing. Stanislav Nováček

.....
Vedoucí oddělení 90E0DU270
Ing. Robert Peňák

.....
Bc. Libor Štěpanovský

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. a Bc. Jiřímu Švestkovi ze společnosti TES s.r.o. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Děkuji

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. ASYNCHRONNÍ STROJ	14
1.1 DĚLENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	14
1.2 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	14
1.2.1 Stator.....	15
1.2.2 Rotor	15
1.3 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU	16
1.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU	18
1.5 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	20
2. FREKVENČNÍ ANALÝZA STATOROVÝCH PROUDŮ	24
2.1 POSTUP APLIKACE MCSA	25
2.2 FOURIEROVA TRANSFORMACE	25
2.3 PORUCHY ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ DETEKOVANÉ MCSA	26
2.3.1 Mechanické poruchy	26
2.3.2 Elektrické poruchy	28
3. PŘEHLED VYHODNOCOVANÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	29
3.1 ELEKTRONAPÁJECÍ (HLAVNÍ NAPÁJECÍ) ČERPADLA (ENČ)	30
3.2 ČERPADLA CHLADÍCÍ CÍRKULAČNÍ VODY (BQDV).....	30
3.3 ČERPADLA POŽÁRNÍ VODY (ČPV)	31
3.4 ČERPADLA NORMÁLNÍHO DOPLŇOVÁNÍ PRIMÁRNÍHO OKRUHU (TK).....	32
3.5 HAVARIJNÍ NAPÁJECÍ ČERPADLA (HNČ)	32
3.6 VYSOKOTLAKÁ HAVARIJNÍ DOPLŇOVACÍ ČERPADLA (TJ)	33
3.7 KONDENZÁTNÍ ČERPADLA I. STUPNĚ (KČ1).....	34
3.8 KONDENZÁTNÍ ČERPADLA II. STUPNĚ (KČ2).....	34
3.9 NÍZKOTLAKÉ KOMPRESORY (NTK)	35
3.10 SUPERHAVARIJNÍ NAPÁJECÍ ČERPADLA (SHNČ)	36
3.11 ČERPADLA TECHNICKÉ VODY DŮLEŽITÉ (TVD)	37
3.12 ČERPADLA TECHNICKÉ VODY NEDŮLEŽITÉ (TVN)	38
3.13 HLAVNÍ CÍRKULAČNÍ ČERPADLA (HČČ).....	39
4. MĚŘICÍ METODA A PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	40
4.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	40
4.2 PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ	41
4.3 POPIS MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ METODOU MCSA.....	43
5. VYHODNOCOVANÉ OBLASTI.....	44
5.1 FREKVENČNÍ ŠUM.....	44
5.2 PORUCHY ROTOROVÝCH TYČÍ	45
5.3 EXCENTRICITA A USTAVENÍ MOTORU	46

6.	NASTAVENÍ LIMIT A KRITÉRIÍ.....	48
6.1	PODKLADY	48
6.2	PRVOTNÍ NÁVRH LIMIT A KRITÉRIÍ	49
6.3	OVĚŘENÍ PRVOTNÍHO NÁVRHU HODNOCENÍ	50
6.3.1	<i>Kategorie A – Výborný.....</i>	<i>51</i>
6.3.2	<i>Kategorie B – Vyhovující.....</i>	<i>52</i>
6.3.3	<i>Kategorie C – Uspokojivý.....</i>	<i>54</i>
6.3.4	<i>Kategorie D – Neuspokojivý.....</i>	<i>55</i>
6.3.5	<i>Kategorie E – Nevyhovující.....</i>	<i>55</i>
6.3.6	<i>Vývoj trendu charakteristických frekvencí.....</i>	<i>55</i>
6.4	OVĚŘENÍ OPTIMALIZOVANÝCH LIMIT A KRITÉRIÍ.....	55
6.4.1	<i>Ověření kategorie A.....</i>	<i>56</i>
6.4.2	<i>Ověření kategorie B.....</i>	<i>57</i>
6.4.3	<i>Ověření kategorie C.....</i>	<i>57</i>
6.4.4	<i>Ověření kategorie D.....</i>	<i>57</i>
6.4.5	<i>Ověření kategorie E.....</i>	<i>58</i>
6.4.6	<i>Ověření vývoje trendu charakteristických frekvencí.....</i>	<i>59</i>
6.5	SYSTÉM LIMIT A KRITÉRIÍ TECHNICKÉHO STAVU ANALYZOVANÝCH MOTORŮ	61
7.	ZHODNOCENÍ STAVU ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	64
7.1	ZHODNOCENÍ AKTUÁLNÍHO STAVU ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	64
7.2	NÁVRH PRAVIDELNÉHO HODNOCENÍ	65
8.	MONITOROVACÍ SYSTÉM ELEKTRO.....	66
8.1	FUNKČNÍ PRINCIP MSE	66
8.2	WEBOVÉ ROZHRANÍ MSE	67
9.	WEBOVÉ DATABÁZOVÉ PROSTŘEDÍ.....	68
9.1	OBRAZOVKA FILTRACE ZÁZNAMŮ	68
9.2	OBRAZOVKY S DETAILNÍMI INFORMACEMI A VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	69
9.2.1	<i>Detail měření</i>	<i>70</i>
9.2.2	<i>Zobrazení protokolu.....</i>	<i>72</i>
9.2.3	<i>Zobrazení frekvenčních spekter jednotlivých poruch.....</i>	<i>72</i>
9.3	POROVNÁVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ	74
9.3.1	<i>Zobrazení poruchy označených měření.....</i>	<i>75</i>
10.	ZÁVĚR.....	77
	LITERATURA.....	79
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Řez asynchronním motorem [4]	15
1.2	Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko [7].....	16
1.3	Řez asynchronním motorem s vinutou kotvou [7]	16
1.4	Princip činnosti asynchronního motoru a časový průběh statorového proudu [8].....	16
1.5	Grafické znázornění vzájemného působení magnetického pole statoru a rotoru [8]	17
1.6	Náhradní schéma asynchronního motoru [10].....	18
1.7	Vektorový diagram asynchronního motoru [8]	19
1.8	Kruhový diagram asynchronního motoru [8]	19
1.9	Zjednodušený kruhový diagram asynchronního stroje pro všechny provozní režimy [8]	20
1.10	Momentová charakteristika asynchronního stroje [11]	21
1.11	Příklad závislosti tvaru momentové charakteristiky na konstrukčním provedení klece rotoru [8]....	21
1.12	Pracovní bod asynchronního motoru [12]	22
1.13	Pracovní body asynchronního motoru ve stabilní a nestabilní oblasti [12]	23
2.1	Přehled excentricit rotoru [13]	27
3.1	Příklad technologického označení daného zařízení v areálu EDU	29
4.1	Klešťový měřicí transformátor proudu měřící proud protékající jednou fází statoru [19]	41
4.2	PC se softwarovým produktem určeným k ovládání mobilní měřicí ústředny a vizualizaci měřených signálů [19].....	42
4.3	Obsluha provádějící měření pomocí měřicí ústředny a PC [19].....	42
4.4	Blokové zobrazení postupu analýzy MCSA [20]	43
5.1	Spektrogram motoru s nízkou úrovní šumu (výpočet proveden přes 2^{23} vzorků)	44
5.2	Spektrogram motoru s vyšší úrovní šumu (výpočet proveden přes 2^{16} vzorků).....	45
5.3	Spektrogram motoru s detekovanou poruchou rotorových tyčí.....	46
5.4	Spektrogram motoru s detekcí excentricity rotoru	47
6.1	Spektrogram motoru s nízkou hodnotou frekvenčního šumu a bez charakteristických frekvencí pro poruchy rotorových tyčí	52
6.2	Spektrogram motoru s nízkou hodnotou frekvenčního šumu a bez charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru	52
6.3	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi pro poruchy rotorových tyčí kategorie B...53	
6.4	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi excentricity a ustavení motoru kategorie B	53
6.5	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruch rotorových tyčí kategorie C	54
6.6	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi excentricity a ustavení motoru kategorie C	55
6.7	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí kategorie D	58
6.8	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy excentricity a ustavení rotoru kategorie D	58
6.9	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy excentricity a ustavení rotoru kategorie E	59
6.10	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí kategorie B s datem měření 26.10.2019.....	60
6.11	Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí kategorie B s datem měření 24.10.2020.....	61
6.12	Porovnání frekvenčního spektra motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí z roku 2019 a 2020	61
9.1	Obrazovka filtrace záznamů.....	68

9.2	Obrazovka s přehledem hledaných motorů	69
9.3	Detail rozbalovacího pole s detailními informacemi k měření.....	69
9.4	Obrazovka detailu měření s obecnými parametry	70
9.5	Obrazovka detailu měření se štítkovými hodnotami	71
9.6	Obrazovka detailu měření s dílčím hodnocením a charakteristickými frekvencemi pro poruchu rotorových tyčí	71
9.7	Obrazovka detailu měření s dílčím hodnocením a charakteristickými frekvencemi pro excentricitu a ustavení motoru	72
9.8	Obrazovka frekvenčního spektra pro poruchu rotorových tyčí	73
9.9	Obrazovka frekvenčního spektra pro excentricitu a ustavení motoru – rozsah 1	73
9.10	Obrazovka frekvenčního spektra pro excentricitu a ustavení motoru – rozsah 2	74
9.11	Detail rozbalovacího pole s požadovanými funkcemi a detail rozbalovacího tlačítka	74
9.12	Obrazovka frekvenčních spekter pro poruchu rotorových tyčí – vykreslena spektra všech označených měření	75
9.13	Obrazovka s tabulkovým zobrazením charakteristických frekvencí	76
9.14	Obrazovka frekvenčních spekter pro poruchu rotorových tyčí – vykreslená spektra pouze dvou měření z šesti označených měření	76

SEZNAM TABULEK

3.1	Parametry AM elektronapájecích čerpadel.....	30
3.2	Parametry AM čerpadel chladicí cirkulační vody	31
3.3	Parametry AM čerpadel požární vody.....	31
3.4	Parametry AM čerpadel normálního doplňování primárního okruhu.....	32
3.5	Parametry AM havarijních napájecích čerpadel.....	33
3.6	Parametry AM vysokotlakých havarijních doplňovacích čerpadel	33
3.7	Parametry AM kondenzátních čerpadel I. stupně.....	34
3.8	Parametry AM kondenzátních čerpadel II. stupně	35
3.9	Parametry AM nízkotlakých kompresorů velkého výkonu	35
3.10	Parametry AM nízkotlakých kompresorů malého výkonu	36
3.11	Parametry AM superhavarijních napájecích čerpadel	36
3.12	Parametry AM superhavarijních napájecích čerpadel	37
3.13	Parametry AM čerpadel technické vody důležité.....	38
3.14	Parametry AM čerpadel technické vody nedůležité	38
3.15	Parametry AM hlavních cirkulačních čerpadel	39
6.1	Klasifikace hodnocení stavu asynchronních motorů pomocí metody MCSA	48
6.2	Přehled hodnocení asynchronních motorů v EDU za rok 2020 prvotním návrhem hodnocení.....	51
6.3	Přehled analyzovaných asynchronních motorů v EDU a ETE	56
6.4	Přehled hodnocení asynchronních motorů v EDU a ETE za rok 2018 až 2020 optimalizovaným návrhem hodnocení	56
6.5	Systém limit a kritérií pro určení technického stavu analyzovaných motorů	62
7.1	Přehled hodnocení asynchronních motorů v EDU za rok 2020.....	64

ÚVOD

V současnosti se všechna průmyslová odvětví setkávají s potřebou zajištění zdrojů mechanické energie pro pohánění nejrůznějších mechanismů a strojů. V drtivé většině tuto potřebu pokrývají asynchronní motory. Díky svým vlastnostem a konstrukčním řešením patří mezi nejpoužívanější stroje na přeměnu elektrické energie na energii mechanickou. Stručným rozbořem asynchronních motorů se proto zabývá první část práce, ve které je popsán princip funkce, konstrukční vlastnosti a provozní parametry asynchronních motorů.

Asynchronní motory jsou zejména využívány jako pohony technologických zařízení a jsou na ně kladeny odpovídající provozní požadavky. V oblasti jaderných elektráren asynchronní motory zajišťují chod technologických prvků, které jsou zásadní pro bezpečný provoz elektrárny. Vzhledem k těmto nárokům vznikla potřeba posouzení stavu asynchronních motorů v projektu definované vazbě na poháněné zařízení za provozu bloku, protože během provozního cyklu bloku jaderného reaktoru není možné odstavit technologická zařízení. Jednou z možných metod diagnostiky asynchronních motorů za provozu je frekvenční analýza statorových proudů, kterou se diplomová práce zabývá ve své hlavní části. V práci je popsán princip diagnostické metody, oblast využití, měřené parametry a postup, kterým se metoda provádí.

V Jaderné elektrárně Dukovany je instalováno několik stovek asynchronních motorů, avšak pro diagnostiku pomocí frekvenční analýzy statorových proudů byla vybrána skupina 188 důležitých pohonů, které slouží pro celou škálu technologických zařízení, zejména čerpadel. Tato zařízení jsou v diplomové práci popsána společně s důležitými parametry asynchronních motorů, které slouží jako pohon těchto zařízení.

Účelem diplomové práce je stručný popis a vyhodnocení provozního stavu asynchronních motorů v Jaderné elektrárně Dukovany pomocí provádění diagnostických měření metodou frekvenční analýzy statorového proudu. Výstupem diplomové práce je databáze asynchronních motorů s možností sledování jejich stavu, nastavení kritérií pro hodnocení stavu asynchronních motorů a návrh pravidelného hodnocení stavu asynchronních motorů. Cílem diplomové práce je zavedení metodického pětistupňového hodnocení pro posouzení aktuálního a dlouhodobého technického stavu analyzovaných motorů za účelem vývoje ucelené metodiky pro hodnocení asynchronních motorů jako rozšíření aplikované prediktivní údržby na úseku divize jaderných elektráren.

1. ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní stroje tvoří skupinu elektrických strojů, které jsou konstruovány za účelem elektromechanické přeměny energie. Základním dělením asynchronních strojů z hlediska provozního režimu je rozdělení na asynchronní generátory a asynchronní motory. Asynchronní generátory slouží k přeměně mechanické energie na energii elektrickou.[1]

Opačný princip reprezentují asynchronní motory, které přeměňují elektrickou energii na energii mechanickou. Asynchronní motory patří díky své jednoduché konstrukci, nízkým pořizovacím nákladům, spolehlivosti a nenáročné údržbě mezi nejpoužívanější elektromotory. Vyrábí se v rozsáhlé výkonové škále od jednotek W do jednotek MW. Díky tomu se využívají napříč celým průmyslovým odvětvím.[1]

Pro potřeby diplomové práce je v této kapitole stručně popsána konstrukce a uvedeny jsou jen základní aspekty principu činnosti asynchronních motorů.

1.1 Dělení asynchronních motorů

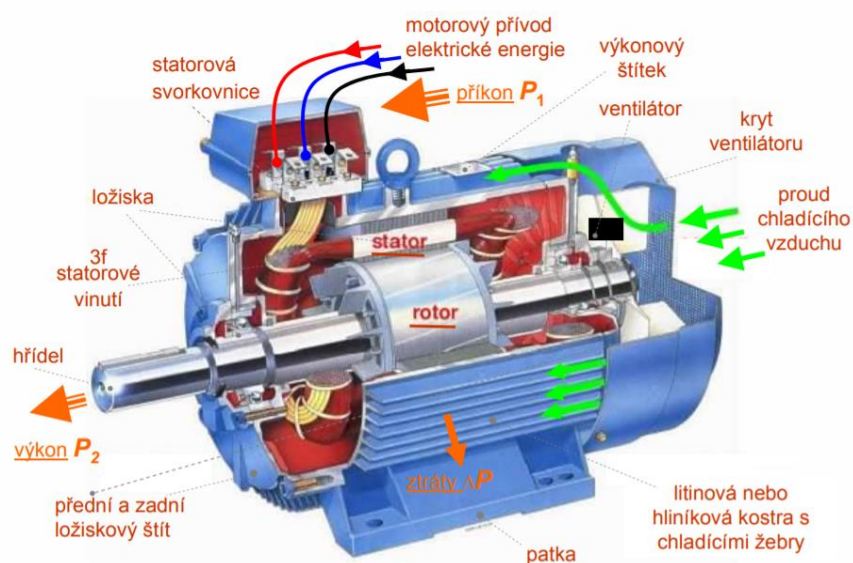
Asynchronní motory mají různá konstrukční řešení a můžeme je dělit z několika hledisek. Dle literatury [2] lze asynchronní motory dělit například dle počtu fází, způsobu chlazení, provedení rotorového vinutí.

Mezi základní rozdělení asynchronních motorů patří dělení podle počtu fází. Podle něj rozlišujeme asynchronní motory třífázové, jednofázové a motory speciální vícefázové. Třífázové asynchronní motory nachází široké uplatnění v technologických provozech jako pohony čerpadel, ovládání armatur nebo pohony ventilátorů. Jednofázové asynchronní motory se uplatňují v lehkých aplikacích, například u ručního nářadí nebo domácích spotřebičů. [2]

Asynchronní motory se dále mohou dělit dle způsobu chlazení. V takovém případě lze rozlišit motory s aktivním nebo pasivním chlazením. Podle konstrukce rotoru lze dělit asynchronní motory s kotvou nakrátko nebo s kroužkovou kotvou. Bližší popis konstrukčního řešení kotvy rotoru je uveden v podkapitole 1.2.2.[3]

1.2 Konstrukce asynchronních motorů

Hlavními konstrukčními celky asynchronních motorů jsou stator a rotor. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera. Na obrázku 1.1 je zobrazen řez asynchronním motorem, kde je přehledně vidět dispozice jednotlivých komponentů.



Obrázek 1.1 Řez asynchronním motorem [4]

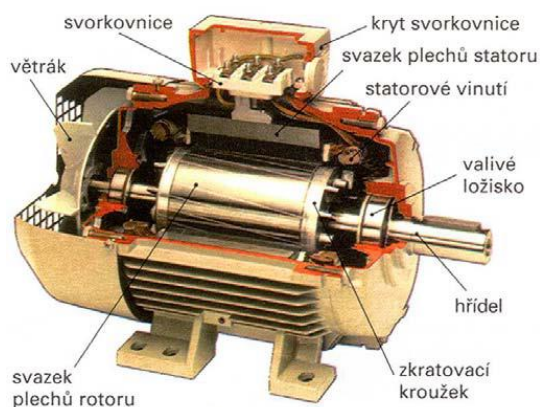
1.2.1 Stator

Stator je stacionární část asynchronních motorů, která se skládá ze statorového tělesa, ložiskových štítů, statorových plechů a statorového vinutí. Nosná konstrukce statoru se vyrábí z litiny nebo hliníku. Magnetický obvod statoru je tvořen sestavou vzájemně izolovaných, magneticky orientovaných plechů. V drážkách magnetického obvodu je uloženo statorové vinutí, jehož konce jsou vyvedeny na svorkovnici motoru. Vinutí jednotlivých fází jsou ve směru otáčení rotoru vůči sobě pootočena o 120° . [5] [6]

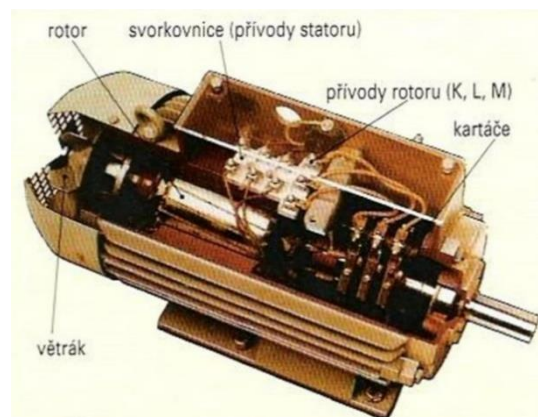
1.2.2 Rotor

Rotor reprezentuje pohyblivou část, která se nachází na hřídeli asynchronních motorů. Je tvořen rotorovými plechy, které jsou nalisované na hřídel motoru. Hřídel je usazená v ložiskách, která jsou uchycena v ložiskových štítech. V drážkách rotorových plechů je uloženo rotorové vinutí – kotva. Kotva se realizuje dvěma způsoby, kotvou nakrátko nebo kroužkovou (vinutou) kotvou. Kotva nakrátko, tzv. klec, je pro motory velkých výkonů obvykle tvořena neizolovanými měděnými nebo mosaznými tyčemi, které jsou pomocí spojovacích kroužků spojeny nakrátko. Pro motory menších výkonů je klec vyrobena jako jeden odlitek. Kroužková (vinutá) kotva je tvořena izolovaným třífázovým vinutím, které je na jednom konci spojeno do hvězdy a na druhém konci je vyvedeno na sběrací kroužky. Tyto kroužky jsou nalisované na hřídeli motoru. Aby bylo zajištěno vyvedení vinutí do svorkovnice motoru, přiléhají ke kroužkům kartáče. [1] [6]

Na obrázcích 1.2 a 1.3 je pro přehlednost zobrazeno konstrukční provedení asynchronního motoru s kotvou nakrátko a asynchronního motoru s vinutou kotvou.



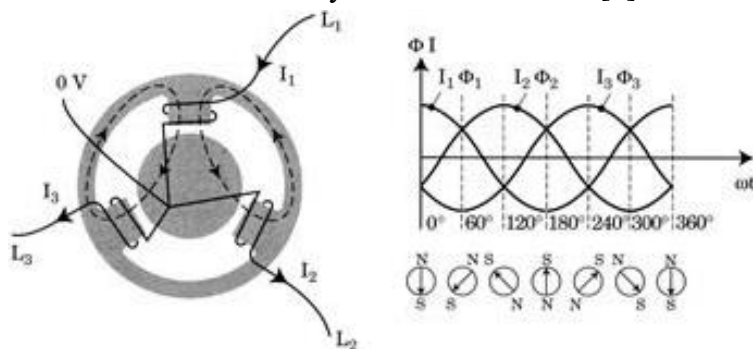
Obrázek 1.2 Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko [7]



Obrázek 1.3 Řez asynchronním motorem s vinutou kotvou [7]

1.3 Princip činnosti asynchronního motoru

Pro popis činnosti uvažujme třífázový asynchronní motor. Přivedeme-li na svorkovnici motoru třífázové napětí, začne vinutím statoru procházet proud. Díky pootočení fází vinutí o 120° dochází k vytvoření točivého magnetického pole, které se otáčí synchronní rychlostí. Na obrázku 1.4 je v levé části naznačen magnetický obvod statoru, ve kterém se vlivem průchodu proudy statorovými vinutími uzavírá magnetický tok a vzniká točivé magnetické pole. V pravé části obrázku 1.4 je znázorněn časový průběh proudů jednotlivými fázemi statorového vinutí asynchronního motoru [5]



Obrázek 1.4 Princip činnosti asynchronního motoru a časový průběh statorového proudu [8]

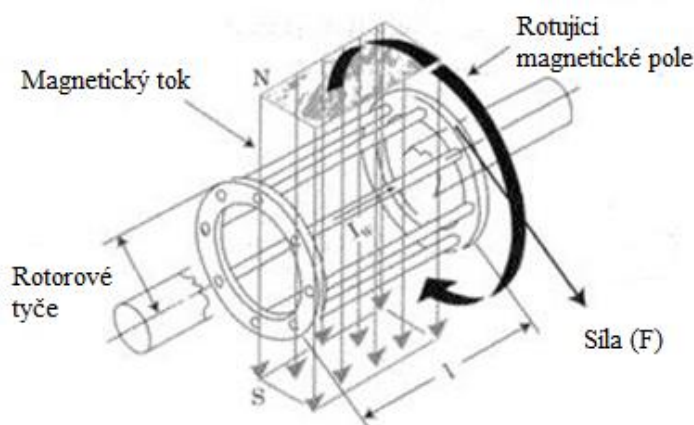
Synchronní otáčky točivého magnetického pole závisí na frekvenci napájecího proudu, počtu pólových dvojic stroje a jsou vyjádřeny vztahem

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1.1)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky stroje, f je frekvence napájecího proudu a p je počet pólových dvojic stroje. [5]

Siločáry točivého magnetického pole protínají vinutí rotoru a indukují v něm napětí. Za předpokladu, že je vinutí rotoru uzavřeno, protéká jím proud a vzniká točivé magnetické pole rotoru. Vzájemným působením magnetických polí vzniká síla, která působí na vodiče ve směru pohybu magnetického pole statoru. Vzniklá síla pak vytváří urychlující moment pro rozběh rotoru.[5]

Názorný příklad protínání siločar točivého magnetického pole statoru s kotvou rotoru a vzájemného působení magnetických polí statoru a rotoru je uveden na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5 Grafické znázornění vzájemného působení magnetického pole statoru a rotoru [8]

Aby došlo k indukování napětí do vinutí rotoru, musí být otáčky rotoru odlišné od synchronních otáček točivého magnetického pole statoru. Rozdíl synchronních otáček točivého magnetického pole statoru a jmenovitých otáček asynchronního motoru je definován jako skluz a je vyjádřen vztahem

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} \cdot 100, \quad (1.2)$$

kde s je skluz, n_s jsou synchronní otáčky a n_n jsou jmenovité otáčky asynchronního motoru. [9]

Mezi synchronními otáčkami, jmenovitými otáčkami asynchronního motoru a točivého magnetického pole rotoru dle literatury [5] platí vztah

$$n_s = n_n + n_r = n_s(1 - s) + n_r, \quad (1.3)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky, n_n jsou jmenovité otáčky asynchronního motoru a n_r jsou otáčky točivého magnetického pole rotoru.

Frekvence indukovaného napětí v rotoru a frekvence proudu procházejícího rotorem je popsána vztahem

$$f_r = s \cdot f, \quad (1.4)$$

kde f je frekvence sítě a s je skluz motoru.[5]

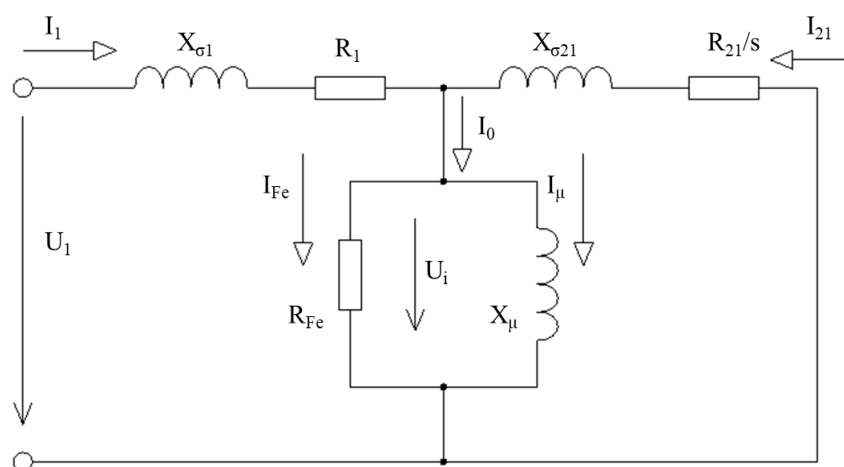
Ze vztahu (1.1), (1.3) a (1.4) lze odvodit vztah pro výpočet otáček točivého magnetického pole rotoru, které jsou dány vztahem

$$n_r = n_s - n_n = \frac{60 \cdot f_r}{p} = \frac{60 \cdot s \cdot f}{p}, \quad (1.5)$$

kde n_r jsou otáčky točivého magnetického pole rotoru, n_s jsou synchronní otáčky, n_n jsou jmenovité otáčky asynchronního motoru, s je skluz, f je frekvence sítě a p je počet pólových dvojic.[6]

1.4 Náhradní schéma asynchronního motoru

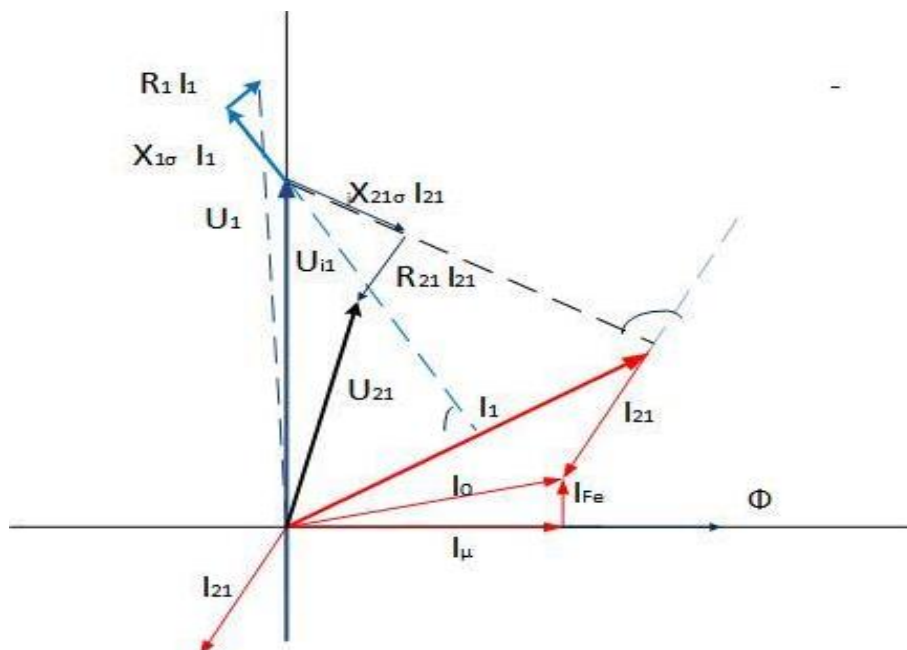
Na obrázku 1.6 je zobrazeno náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru,



Obrázek 1.6 Náhradní schéma asynchronního motoru [10]

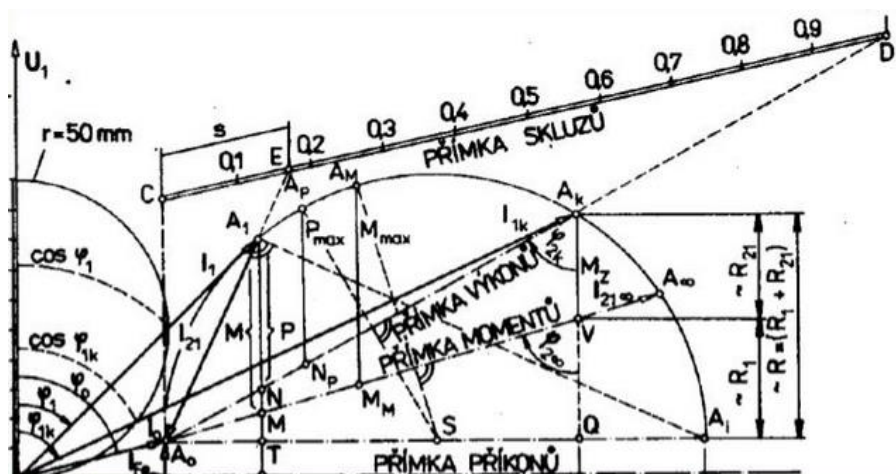
kde R_1 je odpor vinutí statoru, $X_{\sigma 1}$ je rozptylová reaktance statorového vinutí, $X_{\sigma 21}$ je rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočítaná na počet závitů statorového vinutí, R_{Fe} je odpor reprezentující ztráty magnetického obvodu (ztráty v železe), X_μ je magnetizační reaktance, R_{21}/s je celkový činný odpor rotoru reprezentující odpor vinutí rotoru a fiktivní odpor (elektrický výkon, který se na statoru přemění na výkon mechanický) přepočítaný na počet závitů statorového vinutí, U_1 je napájecí napětí statorového vinutí, I_1 je napájecí proud statorového vinutí, I_{21} je proud procházející rotorovým vinutím přepočítaný na počet závitů statorového vinutí, I_{Fe} je proud reprezentující ztráty v magnetickém obvodu (ztráty v železe), I_μ je magnetizační proud, I_0 je proud naprázdno a U_i je indukované napětí ve vinutí stroje. [5]

Odpovídající vektorový diagram je uveden na obrázku 1.7.



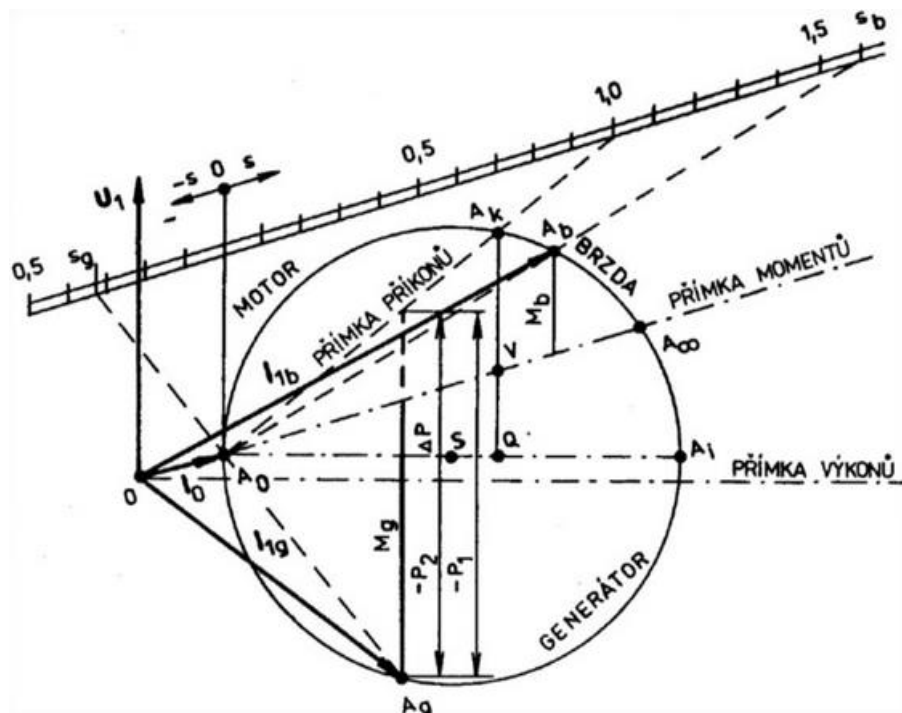
Obrázek 1.7 Vektorový diagram asynchronního motoru [8]

Zatímco vektor I_0 je při všech provozních stavech stejný, vektor I_1 je přímo závislý na provozním stavu a určuje pracovní bod asynchronního motoru. Všechny pracovní body asynchronního motoru při různém zatížení vyjadřuje kruhový diagram, který je uveden na obrázku 1.8.



Obrázek 1.8 Kruhový diagram asynchronního motoru [8]

Všechny pracovní body ve všech provozních režimech asynchronního stroje vyjadřuje zjednodušený kruhový diagram, který je uveden na obrázku 1.9.



Obrázek 1.9 Zjednodušený kruhový diagram asynchronního stroje pro všechny provozní režimy [8]

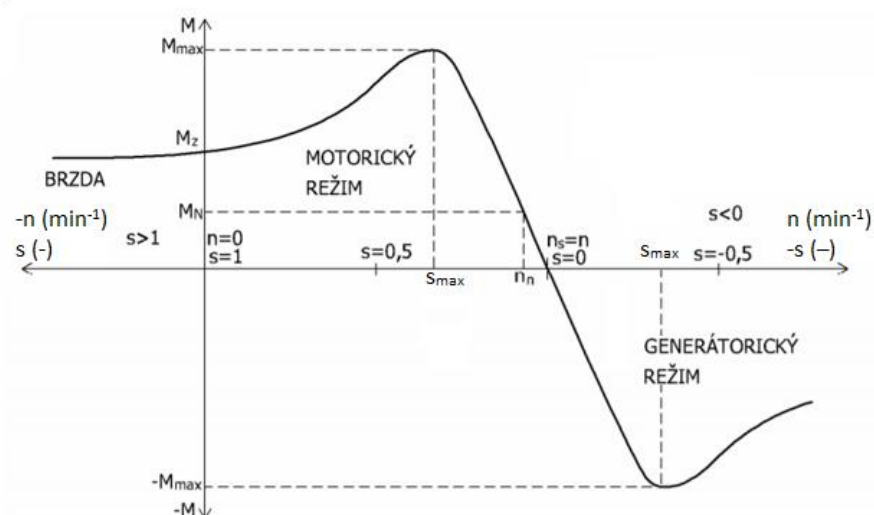
1.5 Momentová charakteristika asynchronního motoru

Momentová charakteristika asynchronních strojů vyjadřuje závislost momentu asynchronního stroje na otáčkách rotoru, resp. na skluzu stroje. Obecně lze momentovou charakteristiku asynchronního stroje rozdělit vzhledem k provoznímu režimu do tří kategorií. Jsou jimi režim motorický, generátorický a režim brzdový. Oblasti jednotlivých režimů jsou vyznačeny v momentové charakteristice na obrázku 1.10.

Pro sestavení momentové charakteristiky lze použít Klossův vztah [6]

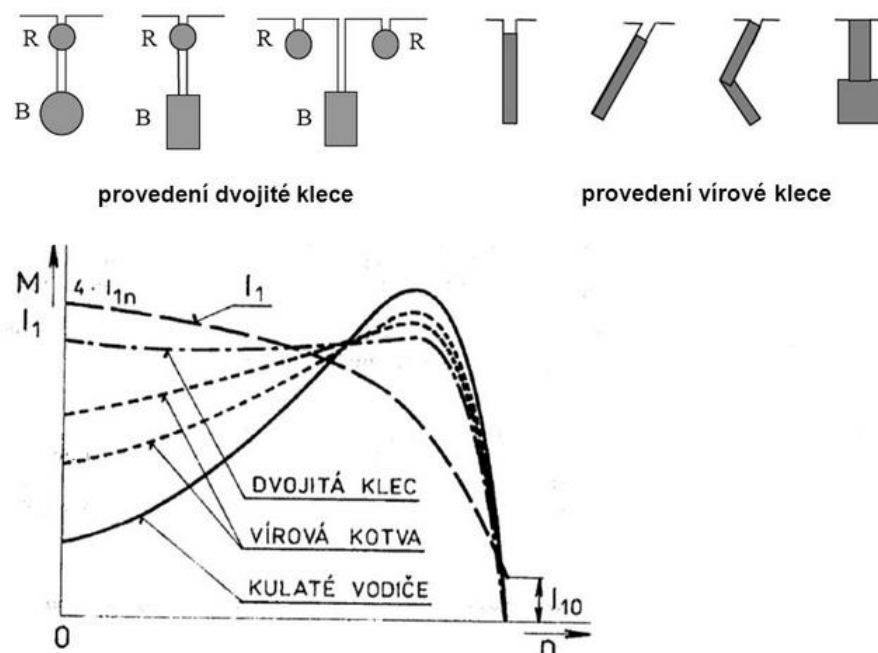
$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s_{max}}{s} + \frac{s}{s_{max}}}, \quad (1.6)$$

kde M je moment na hřídeli motoru, M_{max} je moment zvratu, s je skluz a s_{max} je maximální skluz.



Obrázek 1.10 Momentová charakteristika asynchronního stroje [11]

Motorický režim asynchronního stroje je vymezen hodnotou skluzu $s = 1 \div 0$, resp. otáčkami rotoru $n = 0 \div n_s \text{ min}^{-1}$. Tvar křivky momentové charakteristiky je dán konstrukčním provedením rotoru. Příklad možných tvarů momentové charakteristiky v závislosti na konstrukčním řešení klece rotoru je uveden na obrázku 1.11.



Obrázek 1.11 Příklad závislosti tvaru momentové charakteristiky na konstrukčním provedení klece rotoru [8]

Mezi parametry, které definují oblast motorického režimu momentové charakteristiky, patří záběrný moment M_z , jmenovitý moment M_n , moment zvratu M_{max} .

Provozní oblast asynchronního motoru lze dělit na oblast stabilní a nestabilní. Nestabilní oblast je ohraničena hodnotou skluzu $s = 1$ a maximálním skluzem s_{max} . Hranicemi stabilní oblasti jsou maximální skluz s_{max} a hodnota skluzu $s = 0$. [1]

V okamžiku připojení motoru ke zdroji elektrické energie ($n=0 \text{ min}^{-1}$, $s=1$) dochází ke vzniku záběrného momentu M_z . Následně dochází ke zvyšování otáček a snižování hodnoty skluzu, až se motor ustálí ve stabilní oblasti na jmenovitých otáčkách n_n a jmenovitém momentu M_n , který je dle literatury [5] dán vztahem

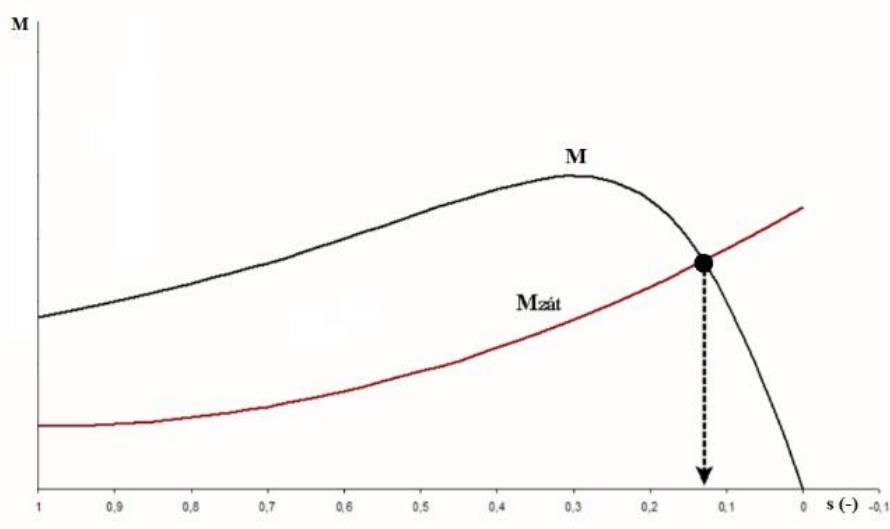
$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\omega_s \cdot (1-s)} = \frac{P_n}{\frac{2\pi f}{60} \cdot (1-s)}, \quad (1.7)$$

kde P_n je jmenovitý výkon motoru, ω_n je úhlová rychlost rotoru a ω_s je úhlová rychlost točivého pole statoru.

Při růstu momentu na hřídeli motoru dochází ke snižování otáček a zvyšování hodnoty skluzu. Mezním bodem je moment zvratu, kterému odpovídá maximální skluz. Pokud moment na hřídeli motoru překročí hodnotu momentu zvratu, dojde k zastavení motoru. [5][6]

Pracovní bod asynchronního motoru je dán průsečíkem momentové charakteristiky motoru a zátěžným momentem hnaného zařízení $M_{zát}$. V tomto průsečíku je brzdný zátěžný moment hnaného zařízení roven hnacímu momentu na hřídeli motoru a soustrojí je v ustáleném stavu. [12]

Grafické znázornění průsečíku momentu zátěže a momentu na hřídeli motoru je zobrazeno na obrázku 1.12.

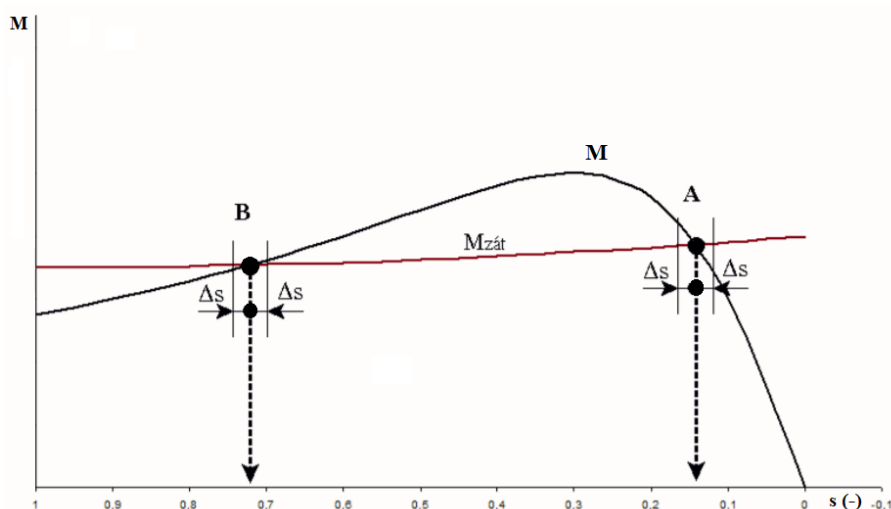


Obrázek 1.12 Pracovní bod asynchronního motoru [12]

Pokud má hodnota zátěžného momentu dostatečnou velikost, lze asynchronní motor teoreticky provozovat v obou provozních oblastech. V praxi se motor provozuje pouze ve stabilní oblasti. Rozdíl provozu asynchronního motoru ve stabilní oblasti (bod A) a nestabilní oblasti (bod B) je uveden na obrázku 1.13.

V pracovním bodě A je zařízení provozováno ve stabilní oblasti. Pokud v této oblasti dojde ke změně otáček soustrojí (změna hodnoty skluzu o Δs), vznikne nerovnováha mezi zátěžným momentem a momentem na hřídeli motoru. Avšak ve stabilní oblasti existuje zpětná vazba na změnu otáček, která působí na obnovení rovnováhy momentů a obnovení ustáleného stavu soustrojí. [12]

V pracovním bodě B je situace odlišná. Dojde-li ke snížení otáček soustrojí, zvýší se hodnota zátěžného momentu a hodnota momentu na hřídeli motoru se sníží. Vzniklý rozdíl momentů vede k zastavení soustrojí. Pokud dojde ke zvýšení otáček soustrojí, hodnota momentu na hřídeli motoru je větší než hodnota zátěžného momentu. Tím dochází ke stálému zvyšování otáček soustrojí, přesunu pracovního bodu do stabilní oblasti a ke vzniku ustáleného stavu. [12]



Obrázek 1.13 Pracovní body asynchronního motoru ve stabilní a nestabilní oblasti [12]

2. FREKVENČNÍ ANALÝZA STATOROVÝCH PROUDŮ

Frekvenční analýza statorových proudů asynchronních motorů, též nazývaná Motor Current Signature Analysis (MCSA), je diagnostická metoda umožňující detekci možné poruchy na rotoru a statoru asynchronních motorů. **Hlavní předností této metody je spolehlivá analýza stavu asynchronního motoru prováděná za skutečných provozních podmínek bez požadavku na odstavení soustrojí.** [13]

Frekvenční analýza statorových proudů je založena na principu frekvenční analýzy napájecího statorového proudu daného asynchronního motoru při zatížení. Uvažujme asynchronní motor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz. V proudovém frekvenčním spektru takového motoru se vykytuje zejména první harmonická a případně procentuálně její násobky, přičemž výraznější jsou násobky liché harmonické (z důvodu rozložení vinutí v drážkách a vlivem změny vzduchové mezery vůči drážkám). Pokud bychom uvažovali asynchronní motor s poruchou statoru nebo rotoru, byly by tyto poruchy v proudovém frekvenčním spektru daného motoru detekovány jako charakteristické frekvence rozdílné od harmonických frekvencí. Hodnoty charakteristických frekvencí se odvíjejí od konstrukčního provedení daného asynchronního motoru. Hodnoty v proudovém frekvenčním spektru se udávají v decibelech (dB). Metoda vyhodnocování analyzovaného motoru spočívá v porovnávání první harmonické amplitudy v proudovém frekvenčním spektru s ostatními amplitudami charakteristických frekvencí dle vztahu

$$A_f = 20 \cdot \log \cdot \left(\frac{I_f}{I_{50\text{Hz}}} \right), \quad (2.1)$$

kde I_f je proud příslušné frekvence a A_f je úroveň signálu téže frekvence normované podle proudu při 50 Hz. [13]

Toto vyjádření umožňuje zobrazovat výsledné signály v lineárních osách při současném amplitudovém potlačení signálu při 50 Hz a zároveň zdůraznění hledaných signálů při ostatních frekvencích. [13]

Zhoršení technického stavu, a s tím spojená závada, se detekuje, pokud amplitudový rozdíl první harmonické a dané charakteristické frekvence je menší než 40 dB. [13]

Frekvenční analýza statorových proudů se dle literatury [13] používá zejména na detekci následujících poruch:

- Statická a dynamická excentricita
- Porucha statorového vinutí
- Porucha rotorových tyčí
- Chyba ustavení motoru.

U asynchronních motorů provozovaných pod zatížením je vyžadována zejména analýza frekvenčních spekter statorového proudu za účelem detekce možné excentricity rotoru a možných poruch a závad rotorových tyčí. Ustavení motoru se projevuje zpravidla

nárustem charakteristických frekvencí velmi blízkých hodnotě charakteristických frekvencí excentricity daných mechanickou vazbou motoru a zátěže. Z tohoto důvodu se provádí hodnocení excentricity rotoru a ustavení motoru zároveň. [13]

2.1 Postup aplikace MCSA

Postup provádění frekvenční analýzy statorových proudů udává literatura [13] a je založen na čtyřech základních krocích.

Prvním krokem je naměření průběhu okamžité hodnoty proudu protékajícího statorovým vinutím. Pro potřeby analýzy je dostačující měření proudu protékajícího jednou fází statorového vinutí. Aby byla zajištěna požadovaná přesnost výsledků metody, je nutné provádět měření v dostatečné kvalitě (vhodně zvolený měřicí rozsah, optimální vzorkovací frekvence a délka záznamu).

Druhým krokem metody je provedení frekvenční analýzy naměřených průběhů proudu pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) a provedení odhadu spektrálního výkonu naměřených průběhů. Popis rychlé Fourierovy transformace je uveden v kapitole 2.2.

Třetím krokem obnáší přiřazení konkrétních frekvenčních spekter k daným typům poruch a závad, která respektují konstrukční provedení daného asynchronního motoru, jeho štítkové hodnoty a aktuální zatížení.

Čtvrtým krokem analýzy je identifikace jednotlivých charakteristických frekvencí a jejich amplitudová úroveň vůči frekvenčnímu spektru za účelem posouzení závažnosti dané poruchy.

2.2 Fourierova transformace

Fourierova transformace patří mezi základní matematické nástroje pro zpracování a analýzu signálů. Používá se pro převod signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční a naopak. Dle vlastností signálu se využívají různé modifikace Fourierovy transformace. [14]

Metoda frekvenční analýzy statorových proudů pracuje s diskrétním rozkladem (signál diskrétně vzorkovaný) periodických signálů ve frekvenční oblasti, proto se pro jejich analýzu využívá rychlá Fourierova transformace (FFT). Jedná se o algoritmus, jehož výhodou je urychlení výpočtu a číslicového zpracování diskrétní Fourierovy transformace. [13]

Pro diskrétní Fourierovu transformaci s konečným počtem prvků platí dle literatury [14] vztah

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}k \cdot n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.2)$$

Výpočet diskretní Fourierovy transformace je ovšem velmi časově náročný. Pro minimalizaci výpočetních kroků a úsporu času byly vyvinuty algoritmy, které využívají speciálních vlastností definice transformace. Využívaný aplikační software pro MCSA využívá algoritmus Cooleyho a Tukeyho, tedy algoritmus s redukcí kmitočtu s prvočíselným rozkladem.[13]

Cooleyho a Tukeyho algoritmus je popsán v literatuře [14] následovně. Vezme-li se v úvahu vztah (2.1), ve kterém se vzorky signálu N rozdělí na sudé a liché vzorky dle vztahu (2.3),

$$e_n = f_{2n}, \quad o_n = f_{2n+1}, \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (2.3)$$

lze následně vztah (2.1) zapsat

$$F_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k) \cdot n} + e^{-j\frac{2\pi}{N}n} \cdot \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k) \cdot n}, \quad (2.4)$$

$$n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1,$$

Definuje-li se

$$E_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k) \cdot n}, \quad O_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k) \cdot n}, \quad (2.5)$$

lze výsledný algoritmus metody popsat vztahem

$$F_n = \begin{cases} E_n + e^{-\frac{2\pi i}{N}n} \cdot O_n, & n < \frac{N}{2} \\ E_{n-\frac{N}{2}} - e^{-\frac{2\pi i}{N}(n-\frac{N}{2})} \cdot O_{n-\frac{N}{2}}, & n \geq \frac{N}{2} \end{cases}. \quad (2.6)$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že pomocí algoritmu se signál s N vzorky rozdělí na dvě transformace o $\frac{N}{2}$ vzorcích.

2.3 Poruchy asynchronních motorů detekované MCSA

Za provozu asynchronních motorů může docházet k různým poruchám. Metodou MCSA lze během provozu asynchronního motoru určité typy poruch detekovat. Tyto poruchy mohou být dvojího charakteru. Jedná se o poruchy mechanické a poruchy elektrické.

2.3.1 Mechanické poruchy

Jednou z nejčastějších mechanických závad u asynchronních motorů bývá nesprávné ustavení motoru vzhledem k poháněnému zařízení. Tato závada se projevuje jako nesouosost, která způsobuje ve spojení motoru a hnaného zařízení tření a deformace,

které působí jako přidavné mechanické zatížení na ložiska i motor samotný. Další častou závadou bývá zejména dynamická nevyváženost rotoru nebo také uvolnění tělesa rotoru (magnetické plechy s konstrukcí klece) vůči hřídeli. Tyto závady způsobují vibrace a excentricity spojené s dynamickými změnami velikosti vzduchové mezery mezi rotorem a statorem asynchronního motoru [13].

2.3.1.1 Excentricita a ustavení motoru

Excentricita rotoru je dle literatury [13] úzce spojena s mechanickými poruchami rotoru a udává, v jaké vzájemné prostorové vazbě je umístění geometrického středu rotoru vůči geometrickému středu statoru a hřídele. Důsledkem excentricity je nadměrné namáhání motoru spojené se zvýšeným opotřebením ložisek vznikem vibrací. Dalším projevem může být změna velikosti vzduchové mezery, a s tím spojená deformace točivého magnetického pole statoru i rotoru.

V praxi se uvažují dva typy excentricity rotoru – statická a dynamická.

Statická excentricita se vyznačuje tím, že rotor je vychýlený z geometrického středu statoru, ale otáčí se v jeho podélné ose. [13]

U dynamické excentricity jsou geometrické středy podélných os hřídele, rotoru a statoru rozdílné a obecně i nerovnoběžné. [13]

Zpravidla se u motorů využívaných v průmyslových odvětvích vyskytuje současně statická i dynamická excentricita. Určitá statická a dynamická excentricita vzniká při samotném výrobním procesu asynchronních motorů, kde je její míra ovlivněna přesností daného výrobního procesu. Dalšími příčinami mohou být například opotřebením ložisek, uvolnění rotoru vůči hřídeli nebo kritická rychlost způsobující rotorové kmity. [13]

Na obrázku 2.1 jsou uvedeny polohy a osy rotoru vůči ose motoru při jednotlivých druzích excentricity.



Obrázek 2.1 Přehled excentricit rotoru [13]

Vlivem statické excentricity dochází ke změnám vzduchové mezery mezi statorem a rotorem v závislosti na aktuální poloze rotoru. V místě, kde je vlivem excentricity způsobeno zmenšení vzduchové mezery, dochází k silnější interakci točivých magnetických polí statoru a rotoru. To má za následek vznik „postranních pásem“, která jsou posunuta vůči síťové frekvenci f o synchronní otáčkovou frekvenci f_{SO} . Charakteristická frekvence statické excentricity je dána vztahem

$$f_{STAT} = f \pm f_{SO} = f \pm \frac{f}{p}, \quad (2.7)$$

kde f je frekvence sítě, f_{SO} je synchronní otáčková frekvence a p je počet pólových dvojic stroje. [15]

Dynamická excentricita se projevuje obdobně jako statická excentricita změnou velikosti vzduchové mezery. Ovšem u dynamické excentricity vzniká mimo závislosti vzduchové mezery na poloze rotoru také závislost na otáčkách rotoru. To se projeví vznikem postranních pásem, která jsou posunuta od frekvence sítě f o otáčkovou frekvenci rotoru f_{rSO} . Charakteristická frekvence dynamické excentricity je popsána vztahem

$$f_{DYN} = f \pm f_{rSO} = f \pm (1 - s) \cdot f_{SO}, \quad (2.8)$$

kde f_{DYN} je charakteristická frekvence dynamické excentricity, f_{rSO} je otáčková frekvence rotoru, f je frekvence sítě a f_{SO} je synchronní otáčková frekvence. [15]

2.3.2 Elektrické poruchy

Elektrické poruchy asynchronních strojů lze dělit na elektrické poruchy statoru a poruchy rotoru. Mezi statorové poruchy se řadí zejména tepelná degradace statorového vinutí. Tento nežádoucí jev může vést ke zkratu mezi statorovým vinutím a kotrrou stroje nebo k mezizávitovému zkratu. [15]

Poruchami rotoru, které lze detekovat frekvenční analýzou statorového proudu, jsou poruchy rotorového vinutí nebo klece rotoru. U asynchronních motorů s vinutou kotvou je nejčastější poruchou opět tepelná degradace rotorového vinutí vedoucí až ke zkratu vinutí s kotvou nebo mezizávitovému zkratu. U klecových motorů může dojít k přerušení rotorové tyče nebo porušení spoje mezi stahovací konstrukcí klece a jednotlivou tyčí. To má za následek vzrůst přechodového odporu ve spojích klece nebo odporovou nesymetrii jednotlivých klecových tyčí. [13]

2.3.2.1 Porucha rotorových tyčí

V případě zvýšení přechodového odporu v jedné z tyčí, v horším případě při přerušení tyče, dochází k zániku symetrického točivého magnetického pole rotoru. To má za následek deformaci magnetického pole uvnitř vzduchové mezery, a s tím spojenou změnu průběhu statorového proudu, oteplení vinutí rotoru nebo vznik nežádoucích deformačních momentů. Charakteristická frekvence pro poruchu rotorových tyčí se projeví v oblasti, která je posunuta od základní harmonické dle vztahu

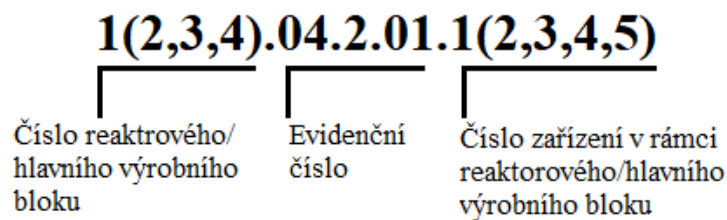
$$f_v = f \cdot (1 \pm 2 \cdot s), \quad (2.9)$$

kde f_v je charakteristická frekvence pro poruchu rotorových tyčí, f je frekvence sítě a s je skluz. [15]

3. PŘEHLED VYHODNOCOVANÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

V následujících podkapitolách jsou uvedeny popisy, označení a parametry 188 typově členěných asynchronních motorů, určených k pohánění technologických zařízení v Jaderné elektrárně Dukovany. Každá podkapitola obsahuje technologické označení daných asynchronních motorů, popis technologie, kterou tyto asynchronní motory pohání, a parametry asynchronních motorů.

Technologické označení se skládá z prvního znaku určujícího číslo reaktorového bloku, popř. hlavního výrobního bloku, ve kterém se dané technologické zařízení nachází. Prostřední znaky jsou evidenční čísla daného technologického zařízení a poslední znak definuje číslo technologického zařízení v rámci reaktorového bloku, popř. hlavního výrobního bloku. Vzhledem k tomu, že každé technologické zařízení používá v rámci hlavních výrobních bloků typově podobné asynchronní motory, jsou pro lepší přehlednost jednotlivé skupiny motorů uvedeny dohromady. Příklad označení je uveden na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Příklad technologického označení daného zařízení v areálu EDU

3.1 Elektronapájecí (Hlavní napájecí) čerpadla (ENČ)

1(2,3,4).04(54).2.01.1(2,3,4,5)

Účelem elektronapájecích čerpadel je dodávka napájecí vody do parogenerátoru. ENČ se uvádí do provozu kdykoliv během náběhu, odstávky nebo při ustáleném provozu, kdy je třeba do parogenerátoru dodávat větší množství vody, než je 60 m³/hod. Každý reaktorový blok obsahuje pět ENČ. Plný výkon reaktorového bloku pokrývají čtyři ENČ a páté ENČ slouží jako rezerva. [16]

Parametry asynchronních motorů, které pohání elektronapájecí čerpadla používaná v EDU, jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Parametry AM elektronapájecích čerpadel

Parametr	Hodnota
Technologické označení	1(2,3,4).04(54).2.01.1(2,3,4,5)
Jmenovitý výkon (kW)	2100,0
Jmenovitý proud (A)	238,0
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
cos φ (-)	0,88
Jmenovité otáčky (ot/min)	2975,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0
Skluz (%)	0,83
Počet pólových dvojic (-)	1
Počet kusů	20

3.2 Čerpadla chladicí cirkulační vody (BQDV)

0(7).16.1.03.1(2,3,4)

Čerpadla chladicí cirkulační vody slouží k distribuci napájecí vody z chladících věží do kondenzátorů turbín a k chlazení technologií sekundárních okruhů (olejové chladiče, vývěvy, stanice zdroje chladu). Pro zajištění dodávky chladicí vody je pro každý hlavní výrobní blok třeba čtyř čerpadel. [16]

Tabulka 3.2 uvádí parametry asynchronních motorů, které pohání čerpadla chladicí cirkulační vody v prostorách EDU.

Tabulka 3.2 Parametry AM čerpadel chladicí cirkulační vody

Parametr	Hodnota
Technologické označení	0(7).16.1.03.1(2,3,4)
Jmenovitý výkon (kW)	4800,0
Jmenovitý proud (A)	590,0,
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
cos φ (-)	0,82
Jmenovité otáčky (ot/min)	371,0
Synchronní otáčky (ot/min)	375,0
Skluz (%)	1,07
Počet pólových dvojic (-)	8
Počet kusů	8

3.3 Čerpadla požární vody (ČPV)

0(7).16.1.06.1(2,3,4)

Čerpadla požární vody slouží k napájení požárního skrápěcího zařízení v prostorách hlavních výrobních bloků. Pro každý HVB jsou vyčleněna čtyři čerpadla. [16]

Tabulka 3.3 udává parametry asynchronních motorů, které pohání čerpadla požární vody pro HVB1 a HVB2.

Tabulka 3.3 Parametry AM čerpadel požární vody

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	0.16.1.06.1(2,3,4)	7.16.1.06.1(2,3,4)
Jmenovitý výkon (kW)	200,0	200,0
Jmenovitý proud (A)	26,6	24,3
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
cos φ (-)	0,8	0,84
Jmenovité otáčky (ot/min)	990,0	989,0
Synchronní otáčky (ot/min)	1000,0	1000,0
Skluz (%)	1,0	1,1
Počet pólových dvojic (-)	3	3
Počet kusů	4	4

3.4 Čerpadla normálního doplňování primárního okruhu (TK)

1(2,3,4) TK20(40,60) D02

Čerpadla normálního doplňování primárního okruhu se starají o doplňování vody do primárního okruhu a o bórovou regulaci. Pro každý reaktorový blok jsou určena tři čerpadla. [16]

Tabulka 3.4 udává parametry asynchronních motorů, které slouží jako pohon pro čerpadla normálního doplňování primárního okruhu jednotlivých RB.

Tabulka 3.4 Parametry AM čerpadel normálního doplňování primárního okruhu

Parametr	Hodnota
Technologické označení	1(2,3,4)TK20(40,60)D02
Jmenovitý výkon (kW)	500,0
Jmenovitý proud (A)	56,0
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
cos φ (-)	0,9
Jmenovité otáčky (ot/min)	2979,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0
Skluz (%)	0,7
Počet pólových dvojic (-)	1
Počet kusů	12

3.5 Havarijní napájecí čerpadla (HNČ)

1(2,3,4).04(54).2.03.1(2)

Havarijní napájecí čerpadla slouží k nouzovému napájení parogenerátorů. Pro šest parogenerátorů jednoho reaktorového bloku jsou k dispozici dvě HNČ. [16]

Parametry asynchronních motorů, které pohání havarijní napájecí čerpadla umístěná v jednotlivých RB, jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tabulka 3.5 Parametry AM havarijních napájecích čerpadel

Parametr	Hodnota
Technologické označení	1(2,3,4).04(54).2.03.1(2)
Jmenovitý výkon (kW)	280,0
Jmenovitý proud (A)	32,0
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
cos φ (-)	0,9
Jmenovité otáčky (ot/min)	2983,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0
Skluz (%)	0,57
Počet pólových dvojic (-)	1
Počet kusů	8

3.6 Vysokotlaká havarijní doplňovací čerpadla (TJ)

1(2,3,4) TJ21(41,61) D01

Vysokotlaká havarijní doplňovací čerpadla jsou instalována za účelem dodávky roztoku kyseliny borité v případě havarijního úniku chladiva primárního okruhu. [16]

Na jeden reaktorový blok jsou instalována tři vysokotlaká havarijní doplňovací čerpadla. Tabulka 3.6 udává parametry asynchronních motorů, které slouží jako pohon pro vysokotlaká havarijní doplňovací čerpadla jednotlivých RB.

Tabulka 3.6 Parametry AM vysokotlakých havarijních doplňovacích čerpadel

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	1(2,3)TJ21(41,61)D01	4TJ21(41,61)D01
Jmenovitý výkon (kW)	500,0	500,0
Jmenovitý proud (A)	56,0	56,5
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
cos φ (-)	0,9	0,89,0
Jmenovité otáčky (ot/min)	2979,0	2970,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0	3000,0
Skluz (%)	0,7	1,0
Počet pólových dvojic (-)	1	1
Počet kusů	9	3

3.7 Kondenzátní čerpadla I. stupně (KČ1)

1(2,3,4).04(54).1.05.1(2,3,4,5,6)

Kondenzátní čerpadla I. stupně slouží k dopravě kondenzátu z kondenzátorů na vstup kondenzátních čerpadel II. stupně. Jeden reaktorový blok je vybaven šesti kondenzátními čerpadly I. stupně. [16]

Parametry asynchronních motorů, které slouží jako pohon pro KČ1 v jednotlivých RB, jsou uvedeny v tabulce 3.7.

Tabulka 3.7 Parametry AM kondenzátních čerpadel I. stupně

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	1(2).04(54).1.05.1(2,3,4,5,6)	3(4).04(54).1.05.1(2,3,4,5,6)
Jmenovitý výkon (kW)	200,0	200,0
Jmenovitý proud (A)	26,6	24,3
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
cos φ (-)	0,8	0,84
Jmenovité otáčky (ot/min)	990,0	989,0
Synchronní otáčky (ot/min)	1000,0	1000,0
Skluz (%)	1,0	1,1
Počet pólových dvojic (-)	3	3
Počet kusů	12	12

3.8 Kondenzátní čerpadla II. stupně (KČ2)

1(2,3,4).04(54).1.06.1(2,3,4,5,6)

Kondenzátní čerpadla II. stupně přejímají pracovní médium od kondenzátních čerpadel I. stupně a dopravují pracovní médium skrz nízkotlakou regeneraci do napájecí nádrže. Kondenzátních čerpadel II. stupně je šest na každý RB, stejně jako kondenzátních čerpadel I. stupně. [16]

Tabulka 3.8 udává parametry asynchronních motorů, které slouží jako pohon pro kondenzátní čerpadla II. stupně pro jednotlivé RB.

Tabulka 3.8 Parametry AM kondenzátních čerpadel II. stupně

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	1(2).04(54).1.06.1(2,3,4,5,6)	3(4).04(54).1.06.1(2,3,4,5,6)
Jmenovitý výkon (kW)	500,0	500,0
Jmenovitý proud (A)	58,2	57,2
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
cos φ (-)	0,88	0,89
Jmenovité otáčky (ot/min)	1488,0	1487,0
Synchronní otáčky (ot/min)	1500,0	1500,0
Skluz (%)	0,8	0,87
Počet pólových dvojic (-)	2	2
Počet kusů	12	12

3.9 Nízkotlaké kompresory (NTK)

9.21.01.01(03).1(2,3,4)

Čtyři nízkotlaké kompresory s velkým výkonem a dva nízkotlaké kompresory s malým výkonem, které pohání asynchronní motory s parametry uvedenými v tabulce 3.9 a tabulce 3.10, zajišťují distribuci stlačeného vzduchu po areálu EDU. [16]

Tabulka 3.9 Parametry AM nízkotlakých kompresorů velkého výkonu

Parametr	Hodnota
Technologické označení	9.21.01.01.1(2,3,4)
Jmenovitý výkon (kW)	630,0
Jmenovitý proud (A)	73,5
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
cos φ (-)	0,9
Jmenovité otáčky (ot/min)	1485,0
Synchronní otáčky (ot/min)	1500,0
Skluz (%)	1,0
Počet pólových dvojic (-)	2
Počet kusů	4

Tabulka 3.10 Parametry AM nízkotlakých kompresorů malého výkonu

Parametr	Hodnota
Technologické označení	9.21.01.03.1(2)
Jmenovitý výkon (kW)	315,0
Jmenovitý proud (A)	35,2
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
cos φ (-)	0,9
Jmenovité otáčky (ot/min)	2959,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0
Skluz (%)	1,37
Počet pólových dvojic (-)	1
Počet kusů	2

3.10 Superhavarijní napájecí čerpadla (SHNČ)

1(2,3,4).04(54).14.01.1(2,3)

Superhavarijní čerpadla jsou instalována za účelem dodávky vody nebo kondenzátu do sekundárního prostoru parogenerátoru během havarijního dochlazování reaktoru. Na jeden reaktorový blok jsou k dispozici tři čerpadla. Tabulka 3.11 a tabulka 3.12 udávají parametry asynchronních motorů, které slouží jako pohon pro superhavarijní napájecí čerpadla pro jednotlivé reaktorové bloky. [16]

Tabulka 3.11 Parametry AM superhavarijních napájecích čerpadel

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	3(4).04(54).14.01.1(2)	1(2).04(54).14.01.2
Jmenovitý výkon (kW)	200,0	200,0
Jmenovitý proud (A)	22,4	23,6
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
Jmenovité otáčky (ot/min)	2967,0	2970,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0	3000,0
Skluz (%)	1,1	1,0
Počet pólových dvojic (-)	1	1
Počet kusů	4	2

Tabulka 3.12 Parametry AM superhavarijních napájecích čerpadel

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	1(2).04.14.01.1	1(2,3,4).04(54).14.01.3
Jmenovitý výkon (kW)	200,0	200,0
Jmenovitý proud (A)	23,0	22,8
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
Jmenovité otáčky (ot/min)	2971,0	2980,0
Synchronní otáčky (ot/min)	3000,0	3000,0
Skluz (%)	0,97	0,67
Počet pólových dvojic (-)	1	1
Počet kusů	2	4

3.11 Čerpadla technické vody důležité (TVD)

0(7).16.1.04.1(2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)

Účelem čerpadel důležité technické vody je dodávka vody pro chlazení technologických zařízení primárního a sekundárního okruhu reaktorových bloků, která jsou důležitá z hlediska jaderné bezpečnosti a jejich provoz musí být zajištěn i při výpadku napájení. Pro zajištění spolehlivosti dodávky technické důležité vody jsou vždy pro dva reaktorové bloky (jeden HVB) sestaveny tři pracovní systémy, které se skládají ze čtyř čerpadel TVD. V každém systému jsou dvě čerpadla hlavní a dvě zálohová. V rámci jednoho systému jsou dvě dvojice čerpadel, skládající se z hlavního a zálohového čerpadla, přičemž jedna dvojice je napájena z jednoho reaktorového bloku a druhá dvojice z bloku sousedního. Pro jeden hlavní výrobní blok je tedy k dispozici dvanáct čerpadel, kdy šest čerpadel je pracovních a šest zálohových [16].

V tabulce 3.13 jsou uvedeny parametry asynchronních motorů, které pohání jednotlivá čerpadla technické vody důležité.

Tabulka 3.13 Parametry AM čerpadel technické vody důležité

Parametr	Hodnota
Technologické označení	0(7).16.1.04.1(2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)
Jmenovitý výkon (kW)	250,0
Jmenovitý proud (A)	32,5
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
Jmenovité otáčky (ot/min)	990,0
Synchronní otáčky (ot/min)	1000,0
Skluz (%)	1,0
Počet pólových dvojic (-)	3
Počet kusů	24

3.12 Čerpadla technické vody nedůležité (TVN)

0(7).16.1.05.1(2,3)

Čerpadla technické vody nedůležité zajišťují dodávku vody pro chlazení spotřebičů v prostorách elektrárny, které nejsou z hlediska jaderné bezpečnosti důležité a může během provozu dojít k jejich výpadku. Pro jeden hlavní výrobní blok jsou určena tři čerpadla, přičemž dvě čerpadla jsou pracovní a jedno čerpadlo je zálohové. [16]

Tabulka 3.14 udává parametry jednotlivých asynchronních motorů, které slouží jako pohon čerpadel technické vody nedůležité pro HVB1 a HVB2.

Tabulka 3.14 Parametry AM čerpadel technické vody nedůležité

Parametr	Hodnota	
Technologické označení	0.16.1.05.1(2)	0(7).16.1.05.1(2,3)
Jmenovitý výkon (kW)	200,0	200,0
Jmenovitý proud (A)	27,5	28,3
Frekvence (Hz)	50,0	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0	6,0
Jmenovité otáčky (ot/min)	740,0	740,0
Synchronní otáčky (ot/min)	750,0	750,0
Skluz (%)	1,33	1,33
Počet pólových dvojic (-)	4	4
Počet kusů	2	4

3.13 Hlavní cirkulační čerpadla (HCČ)

1(2,3,4) YD11(12,13,14,15,16) D01

Účelem hlavních cirkulačních čerpadel v jaderné elektrárně je zajišťování pohybu teplosměnného média v aktivní zóně reaktoru. Na jeden reaktorový blok připadá šest hlavních cirkulačních čerpadel, která jsou umístěna v linii za parogenerátorem v jednotlivých cirkulačních smyčkách. Vzhledem k této dispozici HCČ saje teplosměnné médium z parogenerátoru a tlačí ho do reaktoru. Tím je zajištěna cirkulace média v aktivní zóně reaktoru a předávání tepla vodě sekundárního okruhu. [16]

Technické parametry hlavních cirkulačních čerpadel jsou uvedeny v tabulce 3.15.

Tabulka 3.15 Parametry AM hlavních cirkulačních čerpadel

Parametr	Hodnota
Technologické označení	1(2,3,4) YD 11(12,13,14,15,16) D01
Jmenovitý výkon (kW)	1600,0
Jmenovitý proud (A)	183,0
Frekvence (Hz)	50,0
Jmenovité napětí (kV)	6,0
$\cos \varphi$ (-)	0,89
Jmenovité otáčky (ot/min)	1492,5
Synchronní otáčky (ot/min)	1500,0
Skluz (%)	0,5
Počet pólových dvojic (-)	2
Počet kusů	24

4. MĚŘÍCÍ METODA A PRŮBĚH MĚŘENÍ

Při provádění analýzy jednotlivých asynchronních motorů bylo postupováno v souladu s metodikou ČEZ_ME_1152r00z01 a podnikovou normou PNE 33 0000 – 6 rev01 společnosti ČEZ, a.s., které jsou uvedeny v seznamu literatury pod číslem [17] a [18]. V této kapitole je popsána metoda měření, která byla prováděna pro získání požadovaných frekvenčních spektrogramů jednotlivých asynchronních motorů v areálu EDU.

Pro pořízení kvalitního záznamu okamžité hodnoty statorového proudu asynchronního motoru vhodného pro další zpracování metodou MCSA firma TES s.r.o. využívá mobilní měřicí ústředny MOSAD[®]-6. Měřicí ústředna MOSAD[®]-6 byla vyvinuta za účelem zaznamenání analogových a dvouhodnotových veličin při zkouškách elektrických zařízení jaderné elektrárny, a proto je vhodná i pro tato měření. Měřicí ústředna je v hardwarové a softwarové konfiguraci přizpůsobena k přímému měření analogových veličin, tj. osazena minimálně řídicí procesorovou kartou a vstupní analogovou měřicí kartou.

Pro zpracování a vyhodnocení záznamu okamžité hodnoty statorového proudu asynchronního motoru využívá firma TES s.r.o. softwarový produkt MCSA-AS-TES. Tento softwarový produkt byl vyvinut firmou TES s.r.o. ve spolupráci s UTEE VUT Brno.

Správnost a korektnost použité diagnostické metody (záznam a vyhodnocení dat) byla ověřena srovnávacím měřením se systémem SKF Dynamic Motor Analyzer EXP4000 používaným pro tuto diagnostiku firmou KONČAR – ELECTRICAL INDUSTRY Inc.

4.1 Podmínky měření

Z důvodu eliminace možného zkreslení analýzy MCSA při dynamické změně zatížení asynchronního motoru je nutné provádět měření elektrických parametrů pouze při ustáleném chodu asynchronního motoru. [17]

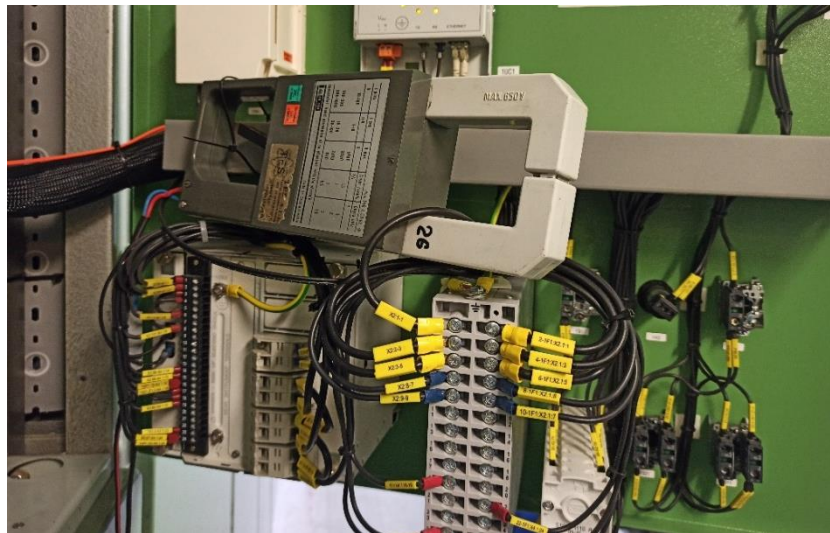
Druhou podmínkou je, aby byl asynchronní motor měřen vždy při běžném provozním zatížení, nebo v případě více provozních výkonových stupních měřen při podobných provozních režimech. Důvodem je vyšší míra přesnosti hodnocení a možné porovnání naměřených hodnot mezi typově podobnými pohony.[17]

4.2 Přístrojové vybavení

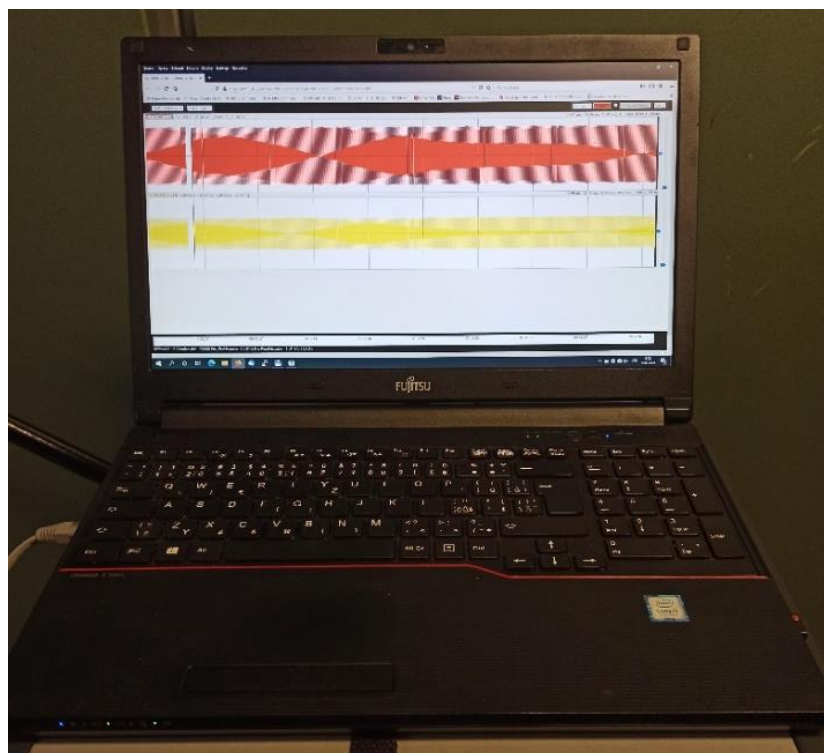
Pro získání vstupních dat pro aplikační software MCSA-AS-TES je nutné provést datový záznam proudu asynchronního motoru měřicí ústřednou MOSAD[®]-6 při ustáleném zatížení a chodu pohonu. Nejdůležitější součásti sestavy měřicí aparatury jsou:

- Klešťový měřicí transformátor proudu PK-200 (METRA Blansko)
- Mobilní měřicí ústředna MOSAD[®]-6 s nakonfigurovanou vzorkovací frekvencí 50 kHz a délkou záznamu 360 sekund
- PC se softwarovým produktem určeným ke konfiguraci, ovládání mobilní ústředny a zpracování a kompilaci formátu dat.

Přístrojové vybavení používané pro provádění záznamu dat je zobrazeno na obrázcích 4.1 až 4.3. Na obrázku 4.1 je zachycen klešťový měřicí transformátor proudu, který měří proud protékající jednou fází statoru měřeného motoru. Obrázek 4.2 zachycuje PC se softwarovým produktem a na obrázku 4.3 lze vidět obsluhu provádějící měřicí úkony na měřicí ústředně a PC.



Obrázek 4.1 Klešťový měřicí transformátor proudu měřící proud protékající jednou fází statoru [19]



Obrázek 4.2 PC se softwarovým produktem určeným k ovládání mobilní měřicí ústředny a vizualizaci měřených signálů [19]



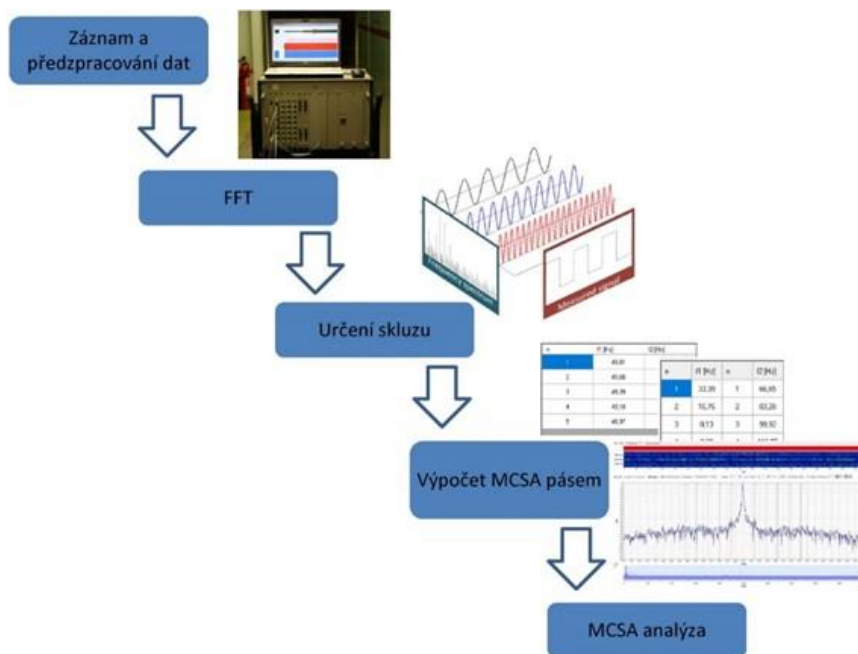
Obrázek 4.3 Obsluha provádějící měření pomocí měřicí ústředny a PC [19]

4.3 Popis měření a vyhodnocení metodou MCSA

V následujících bodech je stručně shrnutý standardní postup měření a navazující postup vyhodnocení pomocí metody MCSA za běžných provozních podmínek pohonu:

- Konfigurace a zapojení mobilní měřicí ústředny MOSAD[®]-6 včetně zapojení měřicích obvodů
- Záznam okamžité hodnoty statorového proudu jedné fáze měřeného motoru. Z důvodu kvality záznamu je rozhodující vhodný rozsah, délka záznamu a vzorkovací frekvence záznamu.
- Kontrola záznamu průběhu proudu a kompilace do formátu dat pro import do aplikace MCSA-AS-TES
- Provedení analýzy frekvenčních spekter metodou rychlé Fourierovy transformace pomocí aplikace MCSA-AS-TES
- Expertní analýza frekvenčních spektrogramů pro jednotlivé typy hledaných poruch a závad rotoru nebo statoru měřeného asynchronního motoru na základě aktualizovaných provozních parametrů motoru
- Vyhodnocení úrovně signálů charakteristických frekvencí ve frekvenčním spektru a posouzení závažnosti a typu případné poruchy asynchronního motoru pomocí postupů znalostí analýzy.

Na obrázku 4.4 je znázorněno blokové zobrazení diagnostické metody MCSA.



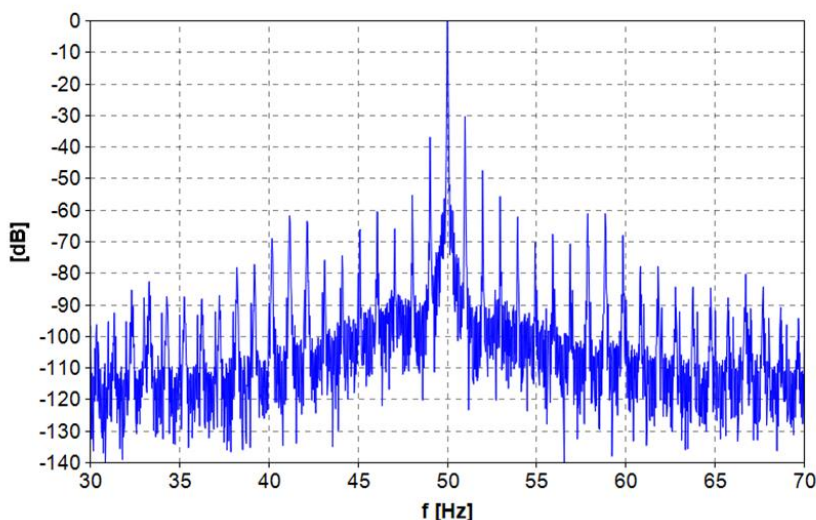
Obrázek 4.4 Blokové zobrazení postupu analýzy MCSA [20]

5. VYHODNOCOVANÉ OBLASTI

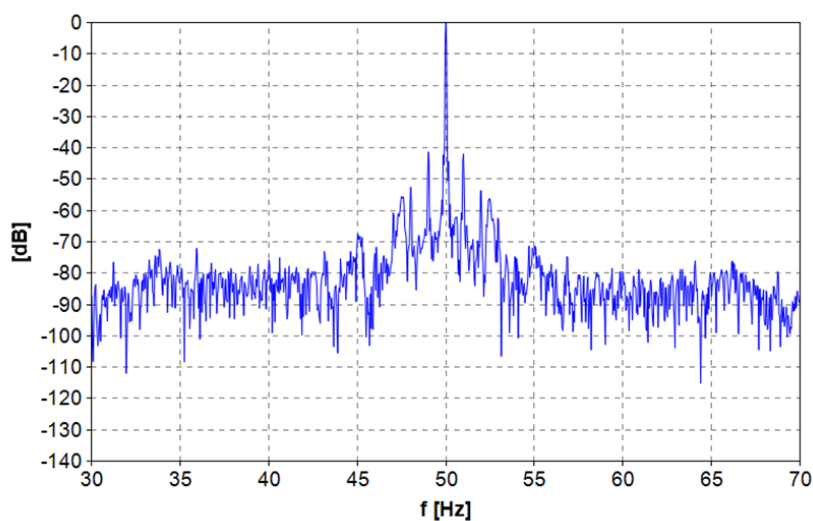
Na základě záznamu dat proudu procházejícího vinutím statoru, sestavení frekvenčních spekter pomocí softwaru a jejich analýzy se u výsledných spektrogramů hodnotí tři základní oblasti. Jedná se o oblast frekvenčního šumu, oblast poruchy rotorových tyčí a oblast poruchy způsobená excentricitou rotoru a ustavením motoru.

5.1 Frekvenční šum

Ve frekvenčních spektrech měřených motorů se v celém frekvenčním rozsahu vyskytuje šum. Během měření docházelo často ke stavu, že u motoru, na kterém bylo prováděno více měření, se hodnota šumu pohybovala v různém rozmezí hodnot. Postupným měřením se došlo k závěru, že hodnota šumu závisí na okolních vlivech. Jedná se především o nasuperponovaný vliv okolní vlastní spotřeby na měřený motor a vlastní vliv rozptylových toků měřeného motoru. Mezi okolní vlivy lze řadit například délku kabelu, na který je měřený motor připojen, zpětné vlivy okolních pohonů nebo skladba zařízení, která jsou napájena společně s měřeným motorem z rozvodny vlastní spotřeby. Příklad této hypotézy je uveden na obrázku 5.1 a obrázku 5.2, na kterých jsou zobrazeny spektrogramy motoru během dvou různých měření. Z obrázků je patrné, že hodnota šumu je u stejného motoru v různém okamžiku měření odlišná. Vyšší úroveň šumu také způsobuje omezení přesnějšího vyhodnocení použitím pouze nižšího počtu vyhodnocovaných vzorků.



Obrázek 5.1 Spektrogram motoru s nízkou úrovní šumu (výpočet proveden přes 2^{23} vzorků)

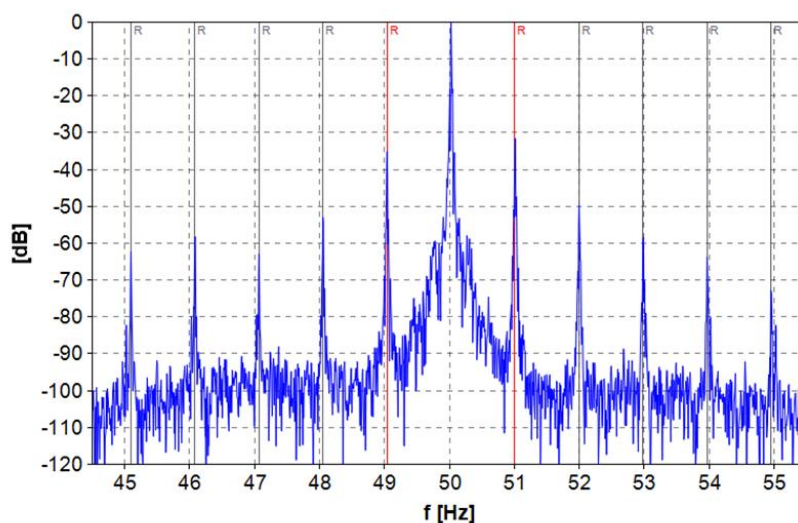


Obrázek 5.2 Spektrogram motoru s vyšší úrovní šumu (výpočet proveden přes 2^{16} vzorků)

5.2 Poruchy rotorových tyčí

V sestavených frekvenčních spektrech se poruchy rotorových tyčí dle literatury [15] projevují převážně výrazným zvýšením charakteristické frekvence v oblasti frekvencí daných vztahem (2.9). Na obrázku 5.3 je znázorněno vypočítané frekvenční spektrum s typickým projevem závady rotorových tyčí. Je zde patrný výrazný nárůst úrovně signálu všech charakteristických frekvencí. Nejvýraznější a nejdůležitější nárůst úrovně signálu je u frekvencí 49,1 Hz a 51,1 Hz, kde došlo k překročení mezní rozhodné úrovně charakterizující poruchu rotorových tyčí.

Motor s diagnostikovanou závadou byl na základě doporučení demontován a na jeho rotorové kleci byla následně nalezena prasklina na spoji rotorové tyče a stahovací konstrukce.

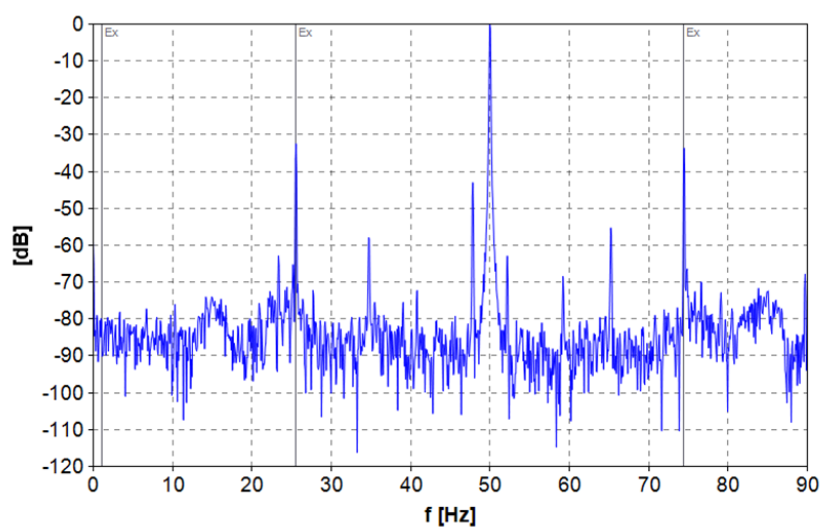


Obrázek 5.3 Spektrogram motoru s detekovanou poruchou rotorových tyčí

5.3 Excentricita a ustavení motoru

Literatura [15] udává, že excentricita rotoru a ustavení motoru se při použití frekvenční analýzy statorového proudu projevuje charakteristickými frekvencemi, které nabývají hodnot dle vztahu (2.7) a (2.8). Rozdíly mezi charakteristickými frekvencemi statické a dynamické excentricity jsou natolik malé, že měřicí metodou nelze rozlišit, zda se u měřeného motoru vyskytuje excentricita statická, dynamická nebo jejich kombinace. Avšak účelem měření není určit druh excentricity, nýbrž vyhodnocení, zda se na měřeném motoru excentricita vyskytuje.

Jako příklad je na obrázku 5.4 uveden spektrogram motoru, na kterém byla diagnostikována excentricita z důvodu vyosení spojky motoru a poháněné technologie. Ve frekvenčním spektru analyzovaného motoru se excentricita rotoru projevila nejvýrazněji u frekvencí 26 Hz a 74 Hz, u kterých byla překročena rozhodná mezní úroveň charakterizující závadu v oblasti excentricity a ustavení motoru.



Obrázek 5.4 Spektrogram motoru s detekcí excentricity rotoru

6. NASTAVENÍ LIMIT A KRITÉRIÍ

Stěžejním tématem diplomové práce je návrh limit a kritérií frekvenčních spekter pro sledované oblasti rotorových tyčí, excentricity a ustavení motoru. Tato frekvenční spektra byla doposud užívána pro hodnocení aktuálního stavu pohonu pomocí dvoustupňového hodnocení (vyhovuje/nevyhovuje). Vzhledem k nedostatku historických záznamů nebyly doposud vyhodnocovány trendy amplitud charakteristických frekvencí jednotlivých oblastí poruch. Pro budoucí porovnávání technického stavu motorů je tedy účelné doplnit sledování trendů amplitud charakteristických frekvencí do nového návrhu kritériálního hodnocení.

Cílem návrhu limit a kritérií je tedy zavedení metodického pětistupňového hodnocení (dle metodiky ČEZ_ME_1152r00z01) pro posouzení aktuálního a dlouhodobého technického stavu analyzovaných motorů. Hodnocení motorů důležitých soustrojí vlastní spotřeby na Jaderné elektrárně Dukovany je rozděleno do stupňů klasifikace v následujícím grafickém provedení:

Tabulka 6.1 Klasifikace hodnocení stavu asynchronních motorů pomocí metody MCSA

A	B	C	D	E
VÝBORNÝ	VYHOVUJÍCÍ	USPOKOJIVÝ	NEUSPOKOJIVÝ	NEVYHOVUJÍCÍ

6.1 Podklady

Základní parametrizace jednotlivých stupňů klasifikace je provedena na základě zahraniční literatury [21] a [22], provozních předpisů provozovatele motorů a odborného technického odhadu. Zmíněná literatura uvádí, že mezní hodnota charakteristických frekvencí ve frekvenčních spektrech pro hodnocení stavu asynchronních motorů je - 40 dB. Pokud charakteristické frekvence překračují mezní hodnotu - 40 dB, na měřeném asynchronním motoru je detekovaná taková porucha, u které je nutné posouzení provozuschopnosti daného motoru.

Významnou roli při vyhodnocování měření hraje zatížení analyzovaného asynchronního motoru. Literatura [22] udává, že při provádění metody MCSA je výhodnější zatížení vyšší než 50 % jmenovité hodnoty. Při nižším zatížení, a tedy nižším skluzu, je odstup charakteristických frekvencí od síťové frekvence nižší. Je tedy velmi pravděpodobné, že rozhodná úroveň charakteristické frekvence splyne s oblastí šumu.

Většina motorů, které jsou analyzovány v Jaderné elektrárně Dukovany, pracují v oblasti 65 ÷ 85 % své nominální hodnoty zatížení. Pouze u několika málo motorů je úroveň zatížení během jejich provozní kampaně vyšší, například až 105 %.

U specifických soustrojí dochází za provozu k plynulé změně zatížení. Toto je typické například u čerpadel TVD, kde dochází k regulaci tlaku v potrubí natáčením lopatek oběžného kola čerpadla. Z hlediska diagnostiky MCSA je důležité tyto motory sledovat při porovnatelně podobném zatížení, nejlépe v několika výkonových úrovních.

Doporučený interval analýz MCSA je jednou za kalendářní rok. V případě zhoršené klasifikace hodnoceného motoru bude doporučeno interval analýz operativně optimalizovat pro častější diagnostiku.

6.2 Prvotní návrh limit a kritérií

Prvotní návrh pro nastavení limit a kritérií vychází ze znalosti mezní hodnoty - 40 dB z literatury [21] a [22] a dále celkovou nejistotou diagnostické metody ± 2 dB.

Mezní hodnota jednotlivých kategorií oblasti excentricity a ustavení motoru a poruchy rotorových tyčí je stejná. Tento předpoklad vychází z literatury [21]. Literatura udává mezní hodnotu - 40 dB, která je pro obě oblasti totožná. Z toho lze předpokládat, že i u jiných mezních hodnot bude zachován stejný charakter hodnocení.

Dále je třeba v návrhu limit a kritérií respektovat trend jednotlivých charakteristických frekvencí provedených analýz. Z vývoje trendu charakteristických frekvencí lze odborným odhadem predikovat buď ustálený technický stav motoru, nebo budoucí rozvoj případné závady v oblasti rotorových tyčí nebo excentricity a ustavení motoru.

Na základě těchto poznatků a informací z kapitoly 5 je sestaveno následující pětistupňové hodnocení.

Kategorie A – Výborný

Do kategorie A spadají motory, jejichž frekvenční spektra splňují následující kritéria:

- Úroveň frekvenčního šumu je nízká (pohybuje se do hodnoty – 55 dB)
- Nevyskytují se žádné charakteristické frekvence charakterizující excentricitu a ustavení motoru
- Nevyskytují se žádné charakteristické frekvence charakterizující poruchy rotorových tyčí.

Kategorie B – Vyhovující

Do kategorie B jsou zařazeny motory, jejichž frekvenční spektra splňují následující kritéria:

- Hodnota frekvenčního šumu je vyšší než - 55 dB
- Úroveň charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru je nižší než - 45 dB
- Úroveň charakteristických frekvencí poruchy rotorových tyčí je nižší než - 45 dB.

Kategorie C – Uspokojivý

Do kategorie C spadají motory, jejichž frekvenční spektra splňují následující kritéria:

- Úroveň charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 45 dB, ale nižší než - 40 dB
- Úroveň charakteristických frekvencí poruchy rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 45 dB, ale nižší než - 40 dB
- Úroveň charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru, nebo poruchy rotorových tyčí je oproti předchozímu vyhodnocení o více jak 10 dB vyšší.

Kategorie D – Neuspokojivý

Do kategorie D spadají motory, jejichž frekvenční spektra splňují následující kritéria:

- Úroveň charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 40 dB, ale nižší než - 30 dB
- Úroveň charakteristických frekvencí poruchy rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 40 dB, ale nižší než - 30 dB.

Kategorie E – Nevyhovující

Do kategorie E spadají motory, jejichž frekvenční spektra splňují následující kritéria:

- Úroveň charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 30 dB
- Úroveň charakteristických frekvencí poruchy rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 30 dB.

6.3 Ověření prvotního návrhu hodnocení

Pro ověření návrhu nastavení limit a kritérií sestavených v předchozí kapitole jsou použity frekvenční spektra 188 asynchronních motorů vlastní spotřeby Jaderné elektrárny Dukovany z roku 2020. Parametry analyzovaného vzorku asynchronních motorů jsou uvedeny v kapitole 3. Při klasifikování stavu asynchronního motoru jsou hodnoceny jednotlivé oblasti excentricity a ustavení motoru a poruchy rotorových tyčí samostatně, přičemž pro přiřazení výsledné kategorie se uvažuje vždy nejhorší zjištěné dílčí kritérium. V tabulce 6.2 je provedeno statistické hodnocení prvotního nastavení limit a kritérií.

Tabulka 6.2 Přehled hodnocení asynchronních motorů v EDU za rok 2020
prvotním návrhem hodnocení

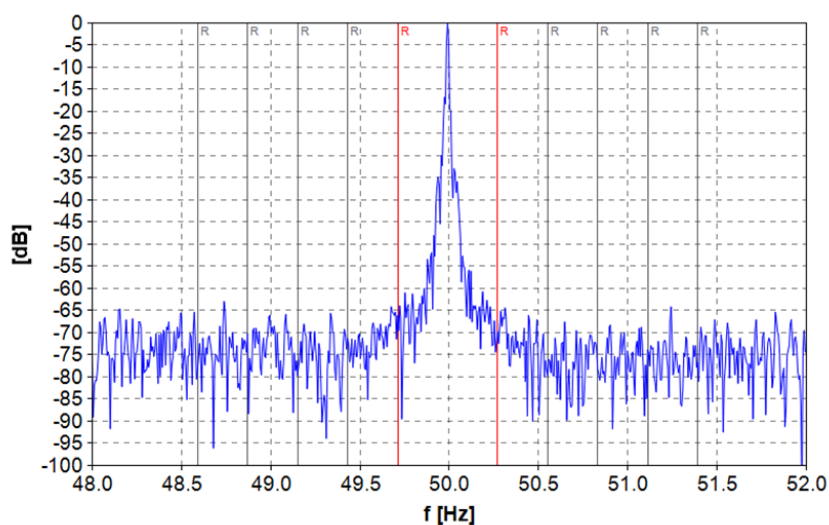
Hodnocení zařízení	Počet asynchronních motorů	
	Absolutní hodnota (ks)	Poměrná hodnota (%)
A VÝBORNÝ	58	30,8
B VYHOVUJÍCÍ	128	68,1
C USPOKOJIVÝ	2	1,1
D NEUSPOKOJIVÝ	0	0
E NEVYHOVUJÍCÍ	0	0

6.3.1 Kategorie A – Výborný

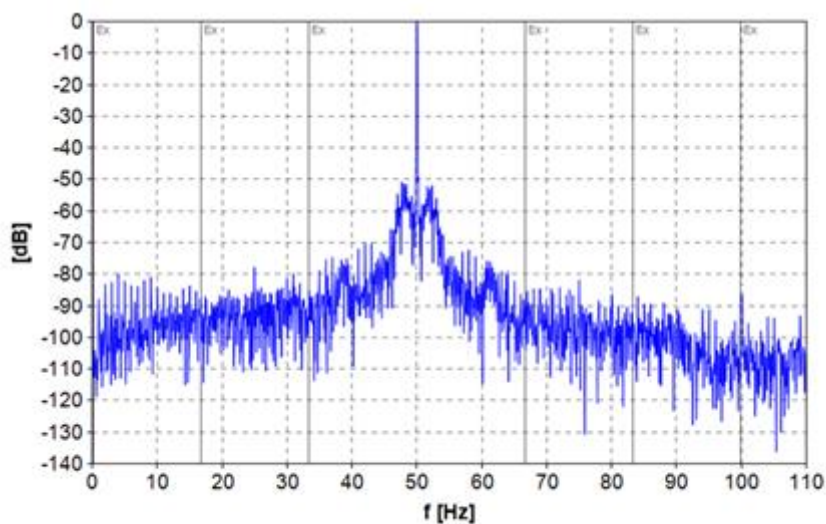
Při ověřování nastavené hodnoty pro úroveň frekvenčního šumu vyšlo najevo, že nastavená mez je příliš vysoko. U 91,5 % analyzovaných motorů hodnota frekvenčního šumu pohybuje do - 65 dB.

Maximální hodnota šumu je proto optimalizovaně stanovena - 60 dB, aby byl vhodný odstup od stanovené meze hodnot charakteristických frekvencí kategorie B a aby frekvenční šum nezakrýval možný výskyt charakteristických frekvencí pro poruchy rotorových tyčí, excentricity a ustavení motoru.

Na obrázku 6.1 a obrázku 6.2 jsou uvedeny příklady frekvenčních spekter asynchronního motoru, u kterého se šum pohybuje v hodnotách do - 60 dB a charakteristické frekvence pro excentricitu a ustavení motoru nebo poruchy rotorových tyčí nejsou ve spektru detekovány.



Obrázek 6.1 Spektrogram motoru s nízkou hodnotou frekvenčního šumu a bez charakteristických frekvencí pro poruchy rotorových tyčí

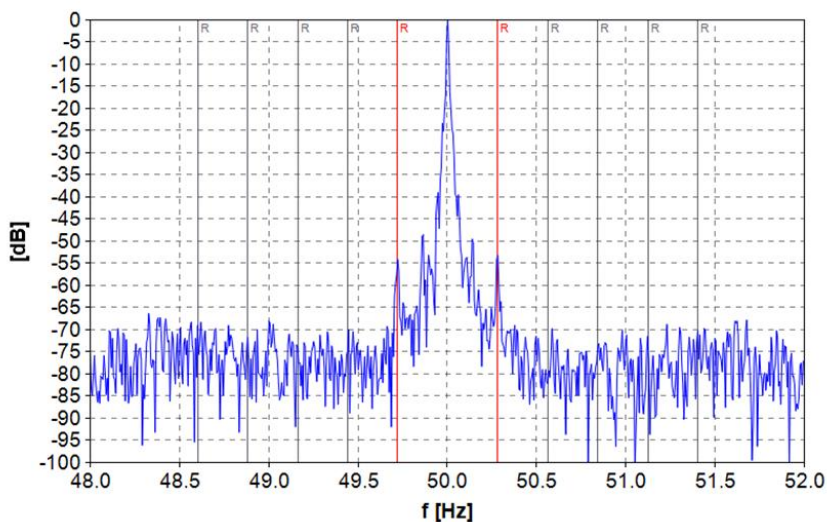


Obrázek 6.2 Spektrogram motoru s nízkou hodnotou frekvenčního šumu a bez charakteristických frekvencí excentricity a ustavení motoru

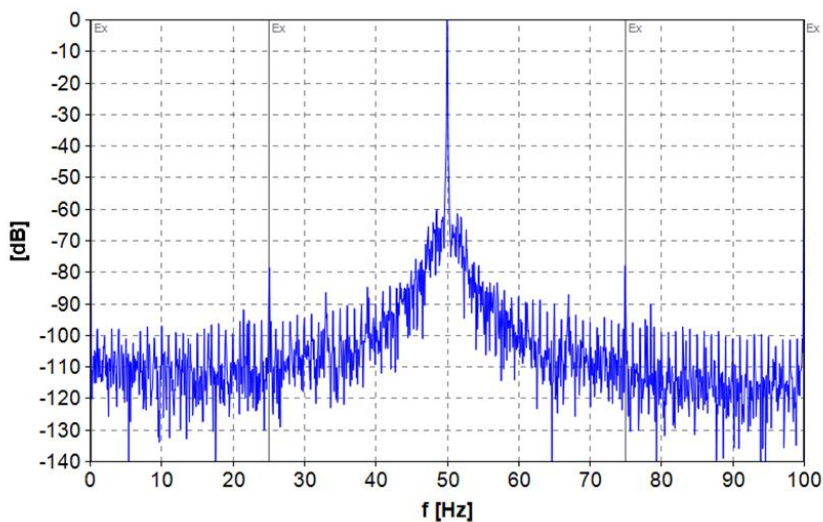
6.3.2 Kategorie B – Vyhovující

Protože se hodnota charakteristických frekvencí u 68,1 % analyzovaných motorů pohybuje v rozmezí - 72 dB ÷ - 53 dB, je maximální povolená hodnota charakteristických frekvencí v kategorii B optimalizovaně posunuta na - 50 dB. Zároveň je tato hodnota považována jako optimální odstup od hodnoty šumu - 60 dB a rozhodovací úrovní charakteristických frekvencí - 40 dB kategorie C.

Na obrázku 6.3 a obrázku 6.4 jsou uvedeny příklady frekvenčních spekter asynchronního motoru, u kterého jsou znatelné charakteristické frekvence pro excentricitu a ustavení motoru nebo poruchy rotorových tyčí a jejich hodnota nepřekračuje hodnotu - 50 dB.



Obrázek 6.3 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi pro poruchy rotorových tyčí kategorie B

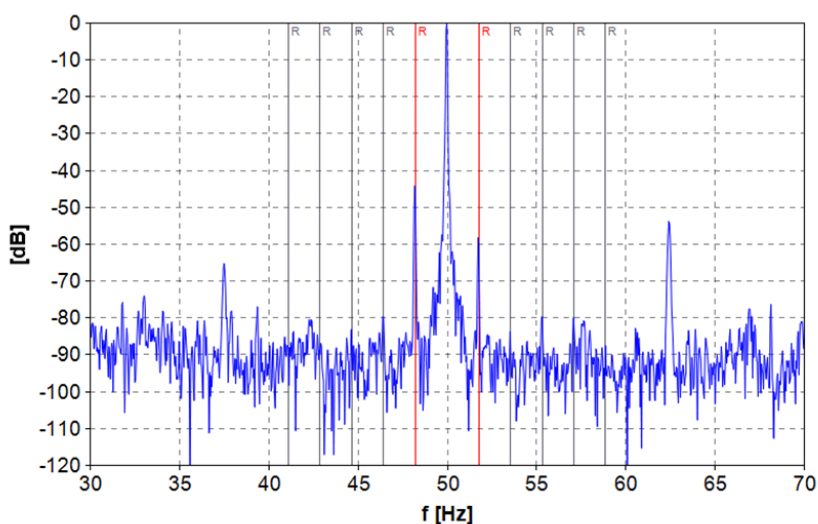


Obrázek 6.4 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi excentricity a ustavení motoru kategorie B

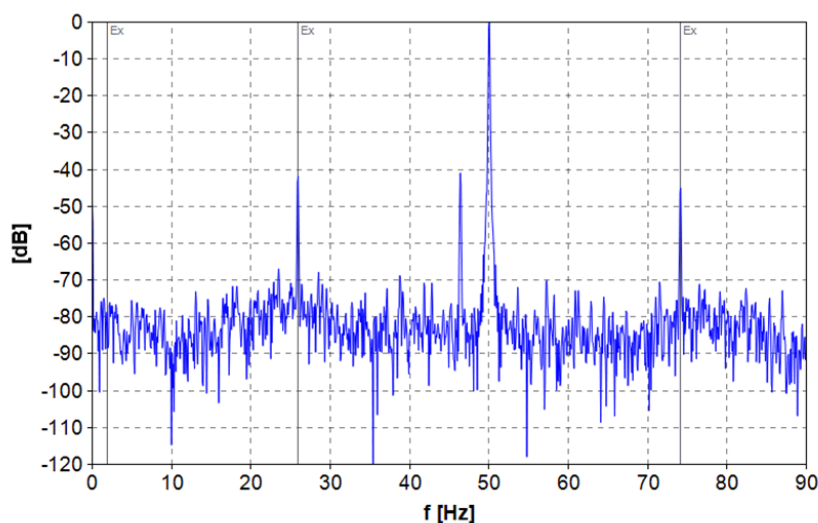
6.3.3 Kategorie C – Uspokojivý

Podle původně zvolených kritérií ($-45 \text{ dB} \div -40 \text{ dB}$) kategorii C odpovídalo 1,1 % analyzovaných motorů. Horní mez hodnot charakteristických frekvencí asynchronních motorů v kategorii C (-40 dB) je převzata z odborné zahraniční literatury [21] a [22]. V návaznosti na kategorii B je spodní mez optimalizovaně posunuta na hodnotu -50 dB . Podle optimalizovaně zvolených kritérií je nově zařazeno 4,3 % analyzovaných motorů do kategorie C.

Na obrázku 6.5 a obrázku 6.6 jsou uvedeny příklady frekvenčních spekter asynchronního motoru, u kterého jsou výrazné charakteristické frekvence pro excentricitu a ustavení motoru nebo poruchy rotorových tyčí a jejich hodnota nepřekračuje hodnotu -40 dB .



Obrázek 6.5 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruch rotorových tyčí kategorie C



Obrázek 6.6 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi excentricity a ustavení motoru kategorie C

6.3.4 Kategorie D – Neuspokojivý

Spodní mez kategorie D (- 40 dB) je stanovena na základě mezní hodnoty kategorie C, popsané v podkapitole 6.3.3. Horní mez není možné ověřit, protože analyzovaný vzorek motorů neobsahuje motor, jehož hodnota charakteristických frekvencí by byla vyšší než - 40 dB. Pro ověření horní meze kategorie C je potřeba větší vzorek motorů.

6.3.5 Kategorie E – Nevyhovující

Stejně jako u kategorie D nelze na základě analyzovaného vzorku asynchronních motorů ověřit návrh stanovené meze kategorie E.

6.3.6 Vývoj trendu charakteristických frekvencí

Pro ověření nastavené mezní hodnoty pro hodnocení vývoje trendu jednotlivých charakteristických frekvencí je analyzovaný vzorek motorů nedostačující, protože je sestaven pouze z analýz za jeden rok. Pro ověření nastavené mezní hodnoty je potřeba minimálně třech po sobě jdoucích měřicích období.

6.4 Ověření optimalizovaných limit a kritérií

Pro celkové ověření nově sestaveného systému limit a kritérií kategorie A, B, C, ověření limit a kritérií kategorií D a E a ověření nastavené mezní hodnoty pro vývoj trendu charakteristických frekvencí je výše analyzovaný vzorek motorů nedostačující. Z toho důvodu jsou pro potřeby diplomové práce použita také frekvenční spektra asynchronních motorů Jaderné elektrárny Dukovany z předchozích let a frekvenční spektra motorů z Jaderné elektrárny Temelín.

Větším počtem analyzovaných motorů je zajištěno ověření optimalizovaných limit a kritérií kategorií A, B a C a dále ověření limit a kritérií kategorií D a E. Dále je také ověřeno hodnocení vývoje trendu charakteristických frekvencí a aplikovatelnosti sestaveného návrhu pro hodnocení provozního stavu asynchronních motorů.

Tabulka 6.3 udává počet analyzovaných frekvenčních spekter, které byly sestaveny z naměřených dat asynchronních motorů v EDU a ETE v letech 2018 až 2020.

Tabulka 6.3 Přehled analyzovaných asynchronních motorů v EDU a ETE

Rok měření	Počet analyzovaných motorů (ks)	
	EDU	ETE
2018	24	62
2019	27	78
2020	188	92
Celkový počet motorů na EDU a ETE		471

V tabulce 6.4 je zobrazeno statistické hodnocení optimalizovaného nastavení limit a kritérií na vzorku motorů z EDU a ETE v letech 2018 až 2020.

Tabulka 6.4 Přehled hodnocení asynchronních motorů v EDU a ETE za rok 2018 až 2020 optimalizovaným návrhem hodnocení

Hodnocení zařízení	Počet asynchronních motorů	
	Absolutní hodnota (ks)	Poměrná hodnota (%)
A VÝBORNÝ	153	32,5
B VYHOVUJÍCÍ	285	60,5
C USPOKOJIVÝ	25	5,3
D NEUSPOKOJIVÝ	6	1,3
E NEVYHOVUJÍCÍ	2	0,4

6.4.1 Ověření kategorie A

U většiny motorů z nově analyzovaného vzorku (94,5 %) jsou hodnoty šumu pod hodnotou - 60 dB. Analýza frekvenčních spekter jednotlivých motorů udává, že u 32,5 % motorů nebyly nalezeny žádné charakteristické frekvence odpovídající excentricitě a ustavení motoru nebo poruchy rotorových tyčí. Z těchto poznatků lze konstatovat, že upravená mezní hodnota pro frekvenční šum - 60 dB je optimálně nastavená.

6.4.2 Ověření kategorie B

Z rozšířeného vzorku analyzovaných asynchronních motorů se u 5,5 % motorů pohybují hodnoty frekvenčního šumu nad hodnotou - 60 dB. Při analýze frekvenčních spekter jednotlivých motorů je zjištěno, že u 60,5 % motorů jsou znatelné charakteristické frekvence odpovídající excentricitě a ustavení motoru nebo poruše rotorových tyčí, které nabývají hodnoty menší než - 50 dB. Z těchto poznatků lze opět konstatovat, že upravené mezní hodnoty jsou optimálně nastaveny.

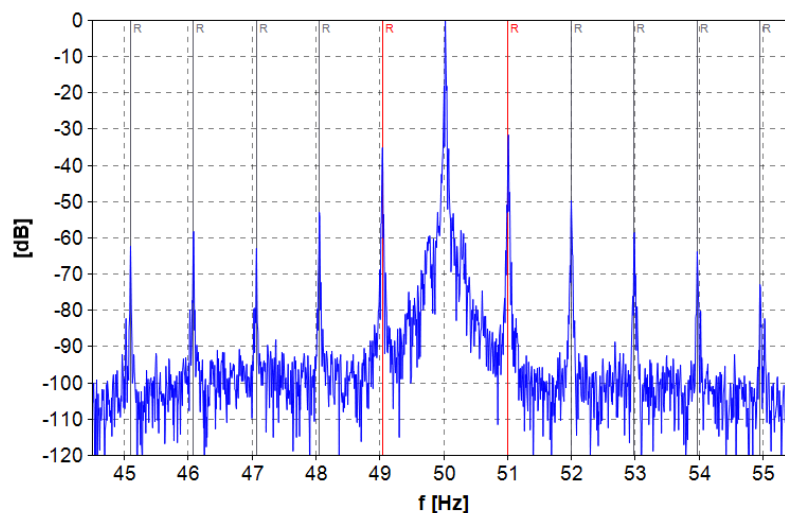
6.4.3 Ověření kategorie C

Do nově nastavených mezí kategorie C spadá 5,3 % z analyzovaného vzorku motorů v EDU a ETE. Vzhledem k tomu, že horní mez kategorie C (- 40 dB) je zvolena v souladu se zahraniční literaturou a spodní mez musí korespondovat s horní mezí kategorie B (- 50 dB), lze nově nastavené meze považovat za vyhovující a optimálně nastaveny.

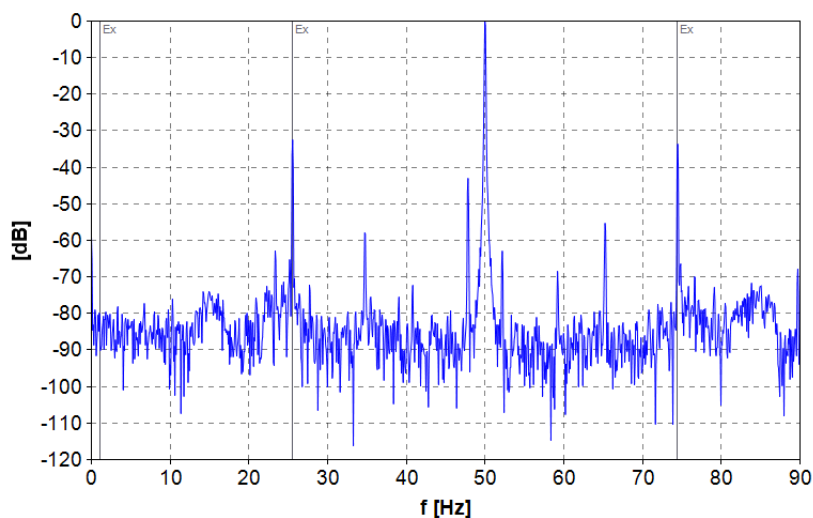
6.4.4 Ověření kategorie D

Při analýze frekvenčních spekter jednotlivých analyzovaných motorů bylo jen 1,3 % zařazeno do kategorie D. Takto malým vzorkem pohonů nelze jednoznačně ověřit horní mez kritéria této kategorie. Protože uvedené procento pohonů je dále omezeně krátkodobě provozované, jsou pravděpodobně kritéria kategorie optimálně nastavená.

Na obrázku 6.7 a obrázku 6.8 jsou uvedeny příklady frekvenčních spekter asynchronních motorů, u kterých jsou velmi výrazné charakteristické frekvence pro excentricitu a ustavení motoru nebo poruchy rotorových tyčí a jejich hodnota nepřekračuje hodnotu - 30 dB.



Obrázek 6.7 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí kategorie D



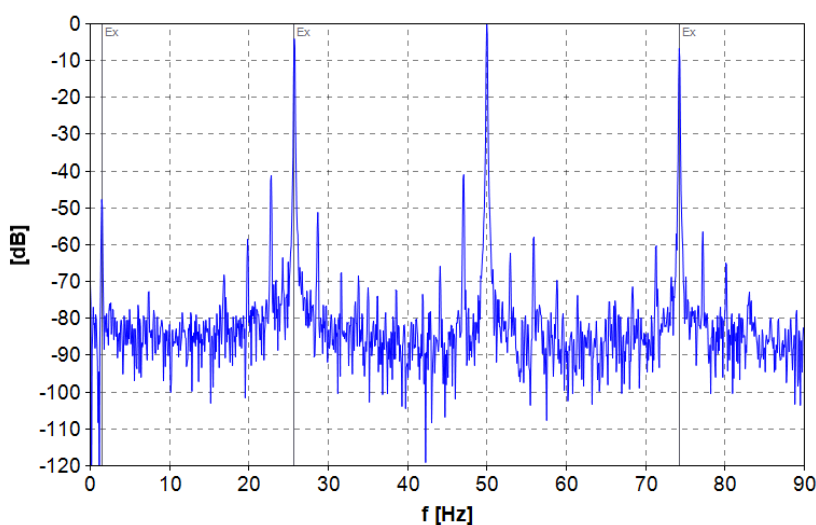
Obrázek 6.8 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy excentricity a ustavení rotoru kategorie D

6.4.5 Ověření kategorie E

V návaznosti na horní mez kategorie D je mezní hodnota kategorie E stanovena na - 30 dB. Dominantní charakteristické frekvence odpovídající excentricitě a ustavení motoru byly při analýze frekvenčních spekter jednotlivých motorů zjištěny u 0,4 % motorů. Takto malým vzorkem pohonů nelze jednoznačně ověřit dolní mez kritéria této kategorie.

Technický stav motorů, které byly zařazeny do kategorie E, nebyl slučitelný s bezpečným provozem, a proto byly okamžitě odstaveny. Protože nevyhovující technický stav hodnocených motorů při překročení mezního kritéria byl prakticky ověřen (i když jen malým vzorkem motorů), jsou pravděpodobně kritéria kategorie optimálně nastavena.

Na obrázku 6.9 je uveden příklad frekvenčního spektra asynchronního motoru, u kterého jsou dominantní charakteristické frekvence pro excentricitu a ustavení motoru. Tyto charakteristické frekvence nabývají v pásmech 27 Hz a 74 Hz hodnoty v rozmezí - 4 dB až - 8 dB.



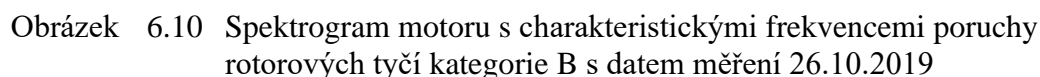
Obrázek 6.9 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy excentricity a ustavení rotoru kategorie E

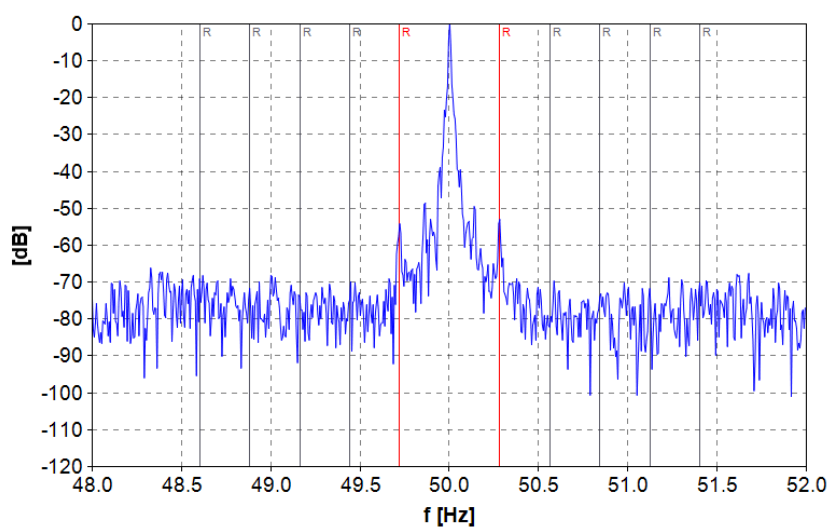
6.4.6 Ověření vývoje trendu charakteristických frekvencí

Z důvodu úpravy mezních hodnot kategorie A, B a C a z výsledků porovnávání charakteristických frekvencí asynchronních motorů za jednotlivá období se odchylka hodnot mezi dvěma analýzami musí z původních 10 dB nově navýšit na 15 dB. Tímto je eliminována nejistota metody a je zamezeno nesprávné kategorizaci motorů.

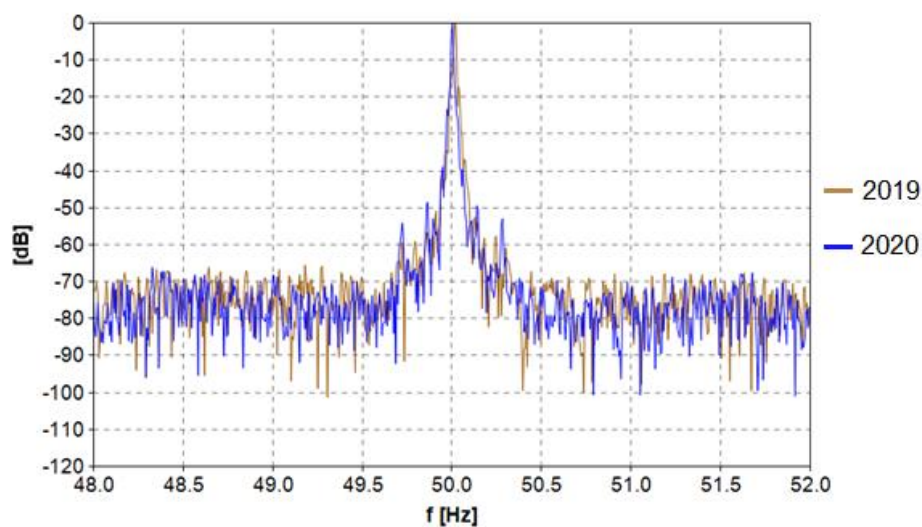
V praxi jsou výše uvedené závěry aplikovány následovně. Pokud se ve frekvenčním spektru analyzovaného motoru objeví nárůst určité charakteristické frekvence oproti minulé analýze o 15 dB a hodnota posuzované charakteristické frekvence je menší než - 40 dB, hodnocený motor automaticky přechází do kategorie C bez ohledu na to, jestli hodnota posuzované charakteristické frekvence spadá do kategorie C. Jestliže však hodnota posuzované charakteristické frekvence překročí mez - 40 dB, musí být hodnocený motor zařazen do kategorie D nebo E.

Možný vývoj trendu charakteristických frekvencí poruch rotorových tyčí je uveden na obrázku 6.10, obrázku 6.11 a obrázku 6.12. Na obrázku 6.10 je zobrazen spektrogram motoru s datem měření 26.10.2019. Zde jsou detekovány charakteristické frekvence poruchy rotorových tyčí, ale jejich hodnota nepřekračuje mezní hodnotu - 50 dB, proto je motor zařazen do kategorie B. Na obrázku 6.11 je zobrazen spektrogram stejného motoru s datem měření 24.10.2020. Z tohoto frekvenčního spektra je patrné, že se hodnota charakteristických frekvencí poruchy rotorových tyčí oproti minulému roku zvýšila. Hodnoty charakteristických frekvencí však nedosáhly hodnot charakteristických pro kategorii C, D nebo E a ani nárůst trendu nedosahuje 15 dB, proto analyzovaný asynchronní motor zůstává nadále v kategorii B. Pro přehlednost je na obrázku 6.12 uvedeno porovnání frekvenčního spektra měřeného motoru za rok 2019 a 2020.





Obrázek 6.11 Spektrogram motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí kategorie B s datem měření 24.10.2020



Obrázek 6.12 Porovnání frekvenčního spektra motoru s charakteristickými frekvencemi poruchy rotorových tyčí z roku 2019 a 2020

6.5 Systém limit a kritérií technického stavu analyzovaných motorů

Na základě výsledků popsanych v předchozích podkapitolách je sestaven přehled jednotlivých kategorií, jejich mezních hodnot a stavu analyzovaného motoru. Tento přehled je uveden v tabulce 6.5.

Tabulka 6.5 Systém limit a kritérií pro určení technického stavu analyzovaných motorů

Hodnocení zařízení	Kritéria přijatelnosti	Stav zařízení
A VÝBORNÝ	Úroveň frekvenčního šumu je nižší než - 60 dB , nevyskytují se jiné výrazné frekvenční složky proudu; úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí stejně jako úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je nevýrazná v blízkosti oblasti šumu. V porovnání s předchozím hodnocením nebyly zjištěny odchylky.	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení.
B VYHOVUJÍCÍ	Úroveň frekvenčního šumu je vyšší než - 60 dB , rozhodující charakteristické frekvence pro hodnocení stavu rotorových tyčí je nižší než - 50 dB; úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je nižší než - 50 dB . V porovnání s předchozím hodnocením nezjištěny odchylky. Pokud v předchozím hodnocení došlo k výraznějšímu nárůstu hodnot sledovaných frekvenčních pásem o 15 dB a v aktuálním hodnocení nedošlo k odchylkám, mění se hodnocení zařízení z C na B.	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, úrovně hodnocených frekvenčních pásem nemají vliv na provozuschopnost zařízení.
C USPOKOJIVÝ	Úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 50 dB , ale nižší než - 40 dB ; úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 50 dB , ale nižší než - 40 dB . V porovnání s předchozím hodnocením zjištěny nárůsty hodnot sledovaných frekvenčních pásem o 15 dB .	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, nutné však sledovat vývoj hodnocených frekvenčních pásem.

Hodnocení zařízení	Kritéria přijatelnosti	Stav zařízení
D NEUSPOKOJIVÝ	Úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 40 dB , ale nižší než - 30 dB ; úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 40 dB , ale nižší než - 30 dB .	Zařízení schopno provozu pouze v omezeném rozsahu, pro zjištění příčiny závady nutnost provedení dalších diagnostických kontrol.
E NEVYHOVUJÍCÍ	Úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 30 dB ; úroveň rozhodujících charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 30 dB .	Stav zařízení neslučitelný s provozem ani v omezeném rozsahu, hrozí trvalé poškození zařízení.

7. ZHODNOCENÍ STAVU ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

7.1 Zhodnocení aktuálního stavu asynchronních motorů

Na základě optimalizovaných limit a kritérií pro hodnocení aktuálního stavu asynchronních motorů uvedených v kapitole 6 je v tabulce 7.1 sestaven přehled hodnocení asynchronních motorů v Jaderné elektrárně Dukovany za rok 2020. V tabulce jsou uvedeny jednotlivé kategorie hodnocení a počet motorů včetně procentuálního zastoupení, které spadají do příslušných kategorií. Tabulka je dále doplněná o hodnocení stavu zařízení, které je používáno pro závěrečné hodnocení v protokolech.

Tabulka 7.1 Přehled hodnocení asynchronních motorů v EDU za rok 2020

Hodnocení zařízení	Počet asynchronních motorů		Stav zařízení
	Absolutní hodnota (ks)	Poměrná hodnota (%)	
A VÝBORNÝ	56	29,8	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení.
B VYHOVUJÍCÍ	124	65,9	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, úrovně hodnocených frekvenčních pásem nemají vliv na provozuschopnost zařízení.
C USPOKOJIVÝ	8	4,3	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, nutné však sledovat vývoj hodnocených frekvenčních pásem.
D NEUSPOKOJIVÝ	0	0	Zařízení schopno provozu pouze v omezeném rozsahu, pro zjištění příčiny závady nutnost provedení dalších diagnostických kontrol.
E NEVYHOVUJÍCÍ	0	0	Stav zařízení neslučitelný s provozem ani v omezeném rozsahu, hrozí trvalé poškození zařízení.

7.2 Návrh pravidelného hodnocení

Vzhledem k velkému počtu posuzovaných motorů každoročně, případně také opakovanému hodnocení v případě zhoršených parametrů, je součástí diplomové práce proveden návrh šablony protokolu o zkoušce, který je uveden v příloze A. Protokol obsahuje:

- Hlavičku protokolu – technologické označení motoru, označení vývodu, datum a čas měření záznamů dat, datum provedení vyhodnocení a číslo pracovního příkazu, na který byla činnost prováděna
- Seznam příloh protokolu – grafické výstupy aplikace MCSA-AS-TES
- Body provedených činností včetně posouzení provedení a posouzení přijatelnosti jednotlivých kroků
- Parametry posuzovaného motoru
- Seznam měřicí aparatury
- Slovní vyhodnocení sledovaných oblastí
- Stanovení klasifikace v pětibodovém kritériálním hodnocení
- Vyhodnocení aktuálního stavu zařízení.

Pro komplexní roční hodnocení posuzovaných motorů je součástí diplomové práce také proveden návrh šablony technické zprávy, která je uvedena v příloze B. Technická zpráva se skládá z teoretické části, přehledu vyhodnocovaných motorů, seznamu provedených měření, analýzy provozního stavu vyhodnocovaných motorů, zhodnocení provozního stavu motorů a návrhu technických opatření ohledně dalšího postupu u motorů, které jsou hodnoceny kategorií C, D nebo E. Podkladem pro technickou zprávu je soubor všech dílčích protokolů v daném roce a technické zprávy z předchozích let. Výsledná zpráva je podkladem pro komplexní hodnocení provozní životnosti technologických souborů pohonů – „HEALTH REPORT“, a dále podkladem pro komisionální hodnocení „Programu řízení stárnutí“ jednotlivých pohonů.

8. MONITOROVACÍ SYSTÉM ELEKTRO

Monitorovací systém elektro (MSE) je určený k monitorování stavů a činností silnoproudých zařízení a k datové komunikaci v oblasti blokové vlastní spotřeby a vyvedení výkonu Jaderné elektrárny Dukovany. Mezi funkce MSE dále patří: [23]

- Sledování a zaznamenávání elektrických signálů přímého měření
- Informování o provozních a poruchových stavech zařízení v oblasti VS a VV EDU
- Vyhodnocování přechodných a poruchových dějů měřených zařízení v oblasti VS a VV EDU
- Sledování dlouhodobého stavu provozu zařízení VS a VV EDU
- Zálohování a archivace dat
- Vizualizace dat prostřednictvím webového rozhraní MSE.

Systém MSE je provozován na platformě monitorovacího systému MOSAD. Významem záznamu dat prostřednictvím MSE je vyhodnocování zkoušek, testů, přechodných a poruchových dějů a sledování spolehlivosti zařízení v oblasti vlastní spotřeby a vyvedení výkonu EDU. Díky tomu je MSE schopen analyzovat nestandardní stavy měřených zařízení, zjišťovat příčiny jejich závad a vyhodnocovat jejich dopad na chod elektrárny, popř. umožnit rychlé odstranění závady. Tím je přispěno ke značnému zkrácení doby poruchy zařízení a jeho odstávky. Dále lze pomocí analýzy a vyhodnocení nestandardních stavů zabránit i u dalších typově podobných zařízení událostem s negativním dopadem na jejich provoz. Tím je zajištěno zvýšení spolehlivosti zařízení a snížení ekonomických ztrát. [23]

8.1 Funkční princip MSE

MSE se skládá z centrální jednotky a měřících ústředí, které jsou umístěny jednotlivě v blízkosti monitorovaných zařízení nebo v blízkosti stávajících vyvedení signálů. Systém MSE se dle způsobu získávání dat dělí na dvě části, dvouhodnotovou a analogovou část. Dvouhodnotová část MSE získává data a informace pomocí binárních vstupů s nepřetržitým časovým rozlišením 1 ms a ukládá je. Analogová část systému získává data a informace pomocí analogových vstupů přímého měření. Aby analogová část MSE započala s ukládáním vstupního signálu, musí vstupní signál splňovat předem definované parametry nebo je pro započetí ukládání potřebná změna některého signálu z binárního vstupu. Vzorkovací frekvence analogového snímání je 2 kHz a 5 kHz. Snímané signály jednotlivých dvouhodnotových a analogových vstupů jsou synchronizovány a pomocí technologie založené na systému MOSAD je možné naměřená data dále matematicky zpracovávat a kontinuálně ukládat. [23]

Systém MSE umožňuje také monitoring, ukládání dat a informací prostřednictvím komunikačních protokolů (např. ModBus, SpaBus) s dalšími externími provozními

zařízeními. Tato funkce je podmíněna třemi základními předpoklady. Prvním předpokladem je časová synchronizace systému MSE a externích provozních zařízení. Časová synchronizace je proto zajištěna normálem GPS a distribucí časových značek ze systému MSE do externích provozních zařízení. Druhým předpokladem je označování dat, které vstupují do systému MSE z měřených technologií, časovou značkou již při vstupu. Třetím předpokladem je konfigurační databáze, která uděluje vlastnosti (původ, cesta přenosu, fyzikální vlastnosti) vstupním signálům. [23]

8.2 Webové rozhraní MSE

Webové rozhraní MSE slouží k rychlému přístupu obsluhy a uživatelů k informacím a datům, které jsou popsány na začátku této kapitoly. Přístup k webovému rozhraní MSE je umožněn prostřednictvím webového prohlížeče a kancelářské sítě DukNET/ČEZnet. Provoz webového portálu MSE je zprostředkován serverem CJ.[23]

Pro potřeby diplomové je využita databázová část webového rozhraní MSE.

9. WEBOVÉ DATABÁZOVÉ PROSTŘEDÍ

Za účelem operativního zpřístupnění výsledků analýzy asynchronních motorů důležitých soustrojí vlastní spotřeby jaderné elektrárny je vytvořena databáze v databázovém prostředí webového rozhraní MSE. Díky této databázi lze rychle a přehledně zobrazit parametry hledaných asynchronních motorů, hodnocení jejich aktuálního stavu, vizualizaci jejich frekvenčních spekter a výpis jednotlivých charakteristických frekvencí dané poruchy. Dále lze pomocí funkce webového prostředí porovnávat frekvenční spektra jednotlivých motorů za různá časová období za účelem sledování vývoje trendu jejich charakteristických frekvencí.

9.1 Obrazovka filtrace záznamů

Na úvodní stránce webového prostředí jsou umístěny filtry pro selekci požadovaných asynchronních motorů. Vizualizace obrazovky je na obrázku 9.1. Pomocí vyplňovacích řádků lze nastavit následující kritéria filtrování:

- Reaktorový blok, ve kterém se hledaný motor nachází
- Technologické označení motoru (měřené zařízení)
- Výrobní číslo motoru
- Časový interval, ve kterém bylo měření provedeno.

Obrázek 9.1 Obrazovka filtrace záznamů

Po vyplnění filtrů a stisknutí tlačítka „ZOBRAZIT“ dojde k zobrazení výpisu hledaných motorů. Vizualizace takto vyhledaných motorů je uvedena na obrázku 9.2. U takto vyhledaných motorů je zobrazen přehled s následujícími informacemi:

- Technologické označení motoru
- Popis hnané technologie
- Aktuální hodnocení podle sestaveného systému limit a kritérií
- Rok příštího měření
- Datum měření
- Výrobní číslo motoru
- Štítkové hodnoty výkonu, proudu, napětí, skluzu a otáček
- Hodnoty proudu, frekvence a skluzu naměřených v posledním měření.

V prvním sloupci zleva jsou umístěna zatrhnávací pole pro individuální výběr zobrazených motorů a v prvním sloupci zprava jsou umístěna rozbalovací pole s odkazy na detailní informace a výsledky měření. Rozbalovací pole obsahuje odkaz na detail měření, protokol o zkoušce a odkaz na frekvenční spektra charakteristická pro poruchu rotorových tyčí, excentricitu a ustavení motoru. Detail rozbalovacího pole s bližšími informacemi k měření je uveden na obrázku 9.3.

	Zařízení	Popis	Hodnocení	Průběh měření	Měření	Vč. motoru	Im výkon	Im napětí	Im proud	Im skaz	Imenovitá otáčky	Proud	Frekvence	Skaz
<input type="checkbox"/>	YD13001	Hlavní cirkulační čerpadlo	B	2021	03.03.2021 12:24	53	1600 1/r	6 000 V	183 A	0,5 %	1 493 1/min	142,8 A	49,99 Hz	0,33 %
<input type="checkbox"/>	YD14001	Hlavní cirkulační čerpadlo	B	2021	03.03.2021 11:23	56	1600 1/r	6 000 V	183 A	0,5 %	1 493 1/min	147,2 A	50,00 Hz	0,35 %
<input type="checkbox"/>	YD15001	Hlavní cirkulační čerpadlo	B	2021	23.02.2021 15:27	51	1600 1/r	6 000 V	183 A	0,5 %	1 493 1/min	132,9 A	49,98 Hz	0,29 %
<input type="checkbox"/>	YD14001	Hlavní cirkulační čerpadlo	B	2021	23.02.2021 15:27	54	1600 1/r	6 000 V	183 A	0,5 %	1 493 1/min	139,3 A	49,98 Hz	0,31 %
<input type="checkbox"/>	YD12001	Hlavní cirkulační čerpadlo	B	2021	23.02.2021 14:57	52	1600 1/r	6 000 V	183 A	0,5 %	1 493 1/min	136,9 A	50,04 Hz	0,30 %
<input type="checkbox"/>	YD15001	Hlavní cirkulační čerpadlo	B	2021	23.02.2021 14:57	55	1600 1/r	6 000 V	183 A	0,5 %	1 493 1/min	141,9 A	50,04 Hz	0,32 %

Obrázek 9.2 Obrazovka s přehledem hledaných motorů

Proud	Frekvence	Skaz
142,8 A	49,99 Hz	0,33 %
147,2 A		
132,9 A		
139,3 A		
136,9 A		
141,9 A	50,04 Hz	0,32 %

Obrázek 9.3 Detail rozbalovacího pole s detailními informacemi k měření

9.2 Obrazovky s detailními informacemi a výsledky měření

V těchto obrazovkách jsou uvedeny detailní informace o zvoleném měření daného motoru. Přístupová cesta k jednotlivým obrazovkám je popsána v kapitole 9.1 a zobrazena na obrázku 9.3.

9.2.1 Detail měření

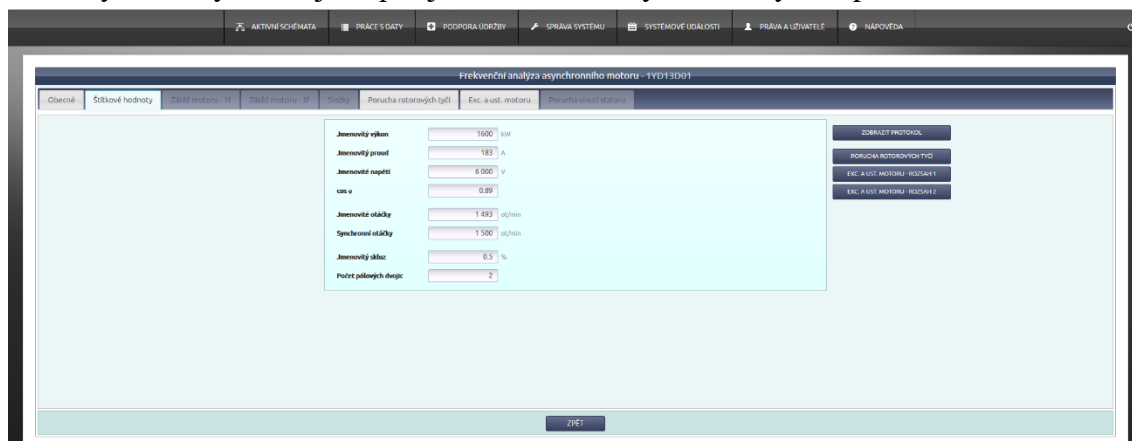
Sekce detailu záznamu měření pro jednotlivé motory je složena ze souboru několika obrazovek. Jedná se o obrazovku s obecnými informacemi, obrazovku se šítkovými hodnotami, obrazovky s přehledem charakteristických frekvencí pro poruchu rotorových tyčí a excentricitu a ustavení motoru, obrazovky výkonů, obrazovku složkové soustavy napájení a obrazovku poruchy vinutí statoru. Pro rychlý pohyb mezi obrazovkami jsou v horní liště umístěna odkazová okna s jednotlivými obrazovkami. Aktuálně jsou aktivní pouze světle podbarvená okna. Šedě podbarvená okna jsou neaktivní a jsou zde umístěna pro další aplikace v rámci vývoje měřicího softwaru. V pravé části obrazovek jsou umístěna odkazová okna, pomocí kterých lze zobrazit náhled protokolu o zkoušce nebo jednotlivé spektrogramy. Vizualizace jednotlivých oken jsou uvedeny na obrázcích 9.4 až 9.7.

Vizualizace obrazovky s obecnými informacemi je uvedena na obrázku 9.4. Na obrazovce jsou uvedeny informace, které slouží k identifikaci zvoleného motoru. Jedná se o technologické označení, popis hnaného zařízení a umístění v rámci reaktorového bloku. Dále je zde uvedeno celkové hodnocení, datum měření, datum příštího měření a naměřené hodnoty proudu, napětí a skluzu. V posledním řádku obrazovky je uveden název zdrojového souboru, který je vytvořen pomocí měřicího softwaru. Tento soubor obsahuje veškerá data, která jsou pro daný záznam měření ve webovém rozhraní použita.

The screenshot displays a web-based software interface for motor analysis. At the top, there is a navigation bar with icons and labels: 'AKTIVNÍ SCHÉMATA', 'PRÁCE S DATY', 'PODPORA UDRŽEV', 'SPRÁVA SYSTÉMU', 'SYSTEMOVÉ UDÁLOSTI', 'PŘÍSLUŠNÁ A UŽIVATELÉ', and 'NÁPOMOC'. Below this, a main header reads 'Frekvenční analýza asynchronního motoru - TYD13D01'. The interface is divided into several sections. On the left, there are tabs: 'Obecné', 'Šítkové hodnoty', 'Základní motor - M', 'Základní motor - S', 'Složky', 'Porucha rotorových tyčí', 'Exc. a ust. motoru', and 'Porucha vinutí statoru'. The 'Obecné' tab is active. The main content area contains a form with the following fields: 'Měřené zařízení' (TYD13D01), 'Popis zařízení' (Hlavní cirkulární čerpadlo), 'Elektrárna' (EDU), 'Blok' (1.BB), 'Celkové hodnocení' (B), 'Příští měření' (2021), 'Datum' (03.03.2021 12:24:16), 'Výp. z. motoru' (53), 'Výp. z. rotoru' (), 'Proud' (143 A), 'Napětí' (V), 'Skluz' (0.33 %), and 'Soubor protokolu' (TES-2-1-125_006). On the right side, there are buttons: 'ZOBRAZIT PROTOKOL', 'PORUCHA ROTOROVÝCH TYČÍ', 'Exc. a ust. motoru - RODNÁ 1', and 'Exc. a ust. motoru - RODNÁ 2'. At the bottom center, there is a 'ZPĚT' button.

Obrázek 9.4 Obrazovka detailu měření s obecnými parametry

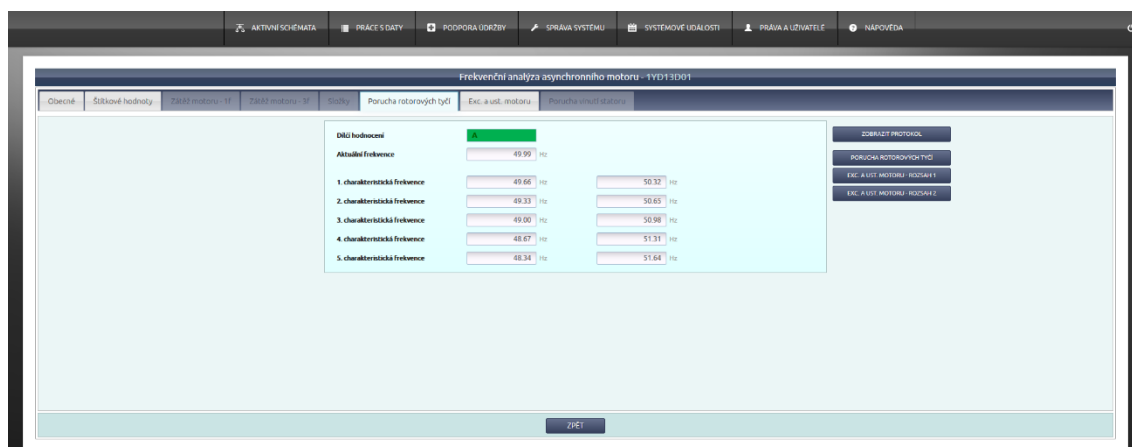
Obrázek 9.5 obsahuje náhled obrazovky se šítkovými hodnotami motoru. Zde jsou uvedeny hodnoty, které jsou pro jednotlivé motory sestaveny v kapitole 3.



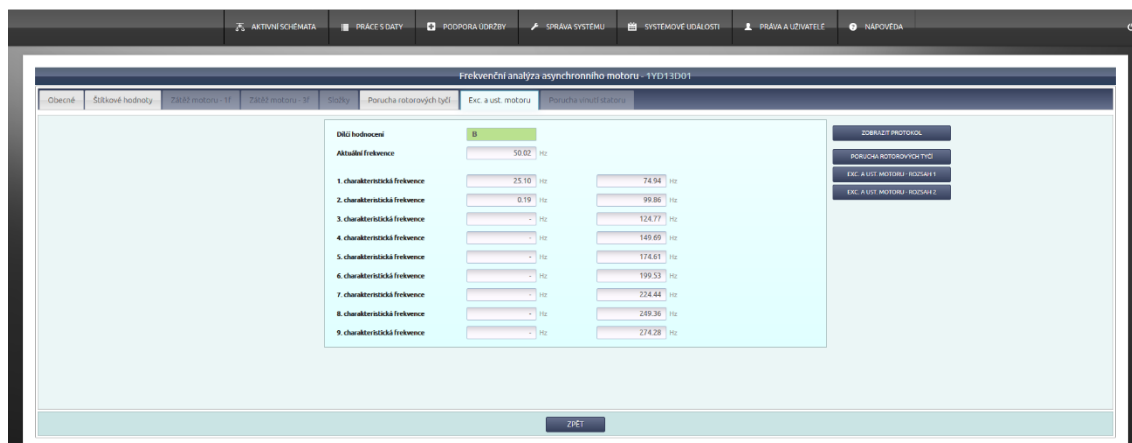
Obrázek 9.5 Obrazovka detailu měření se šítkovými hodnotami

Na obrázku 9.6 a obrázku 9.7 jsou zobrazeny obrazovky, ve kterých je uveden tabulkový přehled charakteristických frekvencí daného motoru pro poruchu rotorových tyčí nebo excentricitu a ustavení motoru. V prvním řádku je uvedeno výsledné dílčí hodnocení pro daný typ poruchy. Druhý řádek udává skutečnou hodnotu frekvence během měření. Následující řádky jednotlivých charakteristických frekvencí, u kterých lze vlivem případné poruchy očekávat zvýšení hodnoty. Jednotlivé charakteristické frekvence jsou vypočítány pomocí měřicího softwaru a jsou graficky vyznačeny v daných frekvenčních spektrech.

Stisknutím tlačítka „ZPĚT“ dojde k navrácení do obrazovky s přehledem hledaných motorů.



Obrázek 9.6 Obrazovka detailu měření s dílčím hodnocením a charakteristickými frekvencemi pro poruchu rotorových tyčí



Obrázek 9.7 Obrazovka detailu měření s dílčím hodnocením a charakteristickými frekvencemi pro excentricitu a ustavení motoru

9.2.2 Zobrazení protokolu

Při navolení aktivního „ZOBRAZIT PROTOKOL“ dojde k otevření dokumentu s vyhotoveným protokolem o zkoušce daného motoru. Vzor protokolu je uveden v příloze A.

9.2.3 Zobrazení frekvenčních spekter jednotlivých poruch

Pokud chce uživatel zobrazit frekvenční spektra pro jednotlivé druhy poruch, musí navolit jeden ze tří aktivních odkazů:

- „ZOBRAZIT PORUCHU ROTOROVÝCH TYČÍ“
- „ZOBRAZIT EXC. A UST. MOTORU – ROZSAH 1“
- „ZOBRAZIT EXC. A UST. MOTORU – ROZSAH 2“.

Obrazovky s frekvenčními spektry pro jednotlivé poruchy jsou uvedeny na obrázcích 9.8 až 9.10. Dispozice rozložení jednotlivých obrazovek jsou totožné. Jako příklad pro popis je zvolena obrazovka s frekvenčním spektrem poruchy rotorových tyčí na obrázku 9.8.

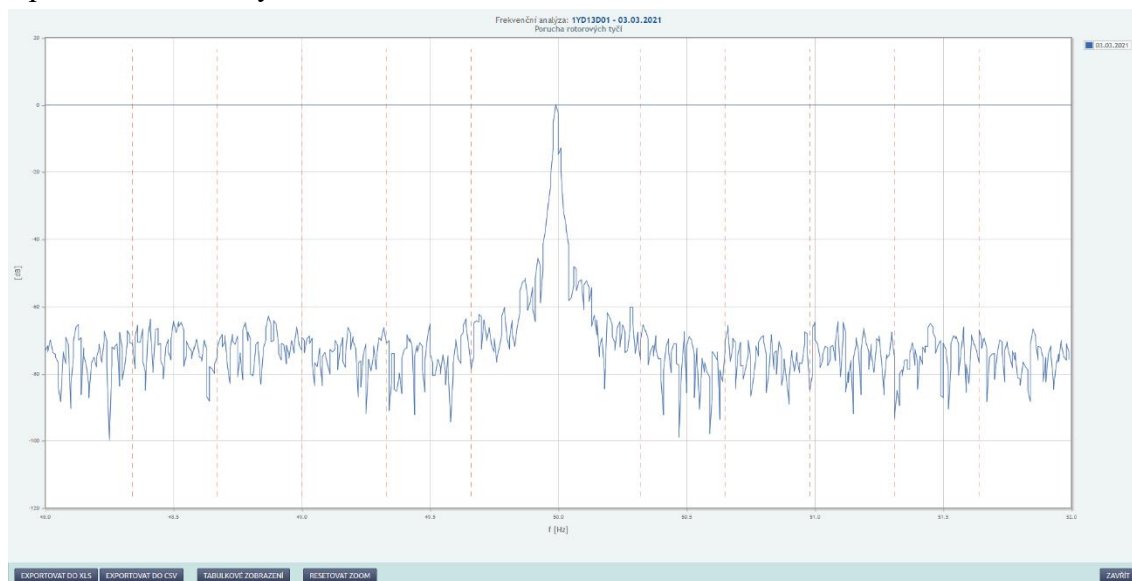
V horní části obrazovky je umístěno popisové pole, ve kterém je uvedeno technologické značení analyzovaného motoru, datum měření a druh poruchy, pro kterou je spektrum sestaveno.

V samotném frekvenčním spektru jsou vyznačeny červenou čárkovanou čarou charakteristické frekvence, u kterých je očekávané zvýšení hodnoty vlivem poruchy. Hodnoty těchto frekvencí jsou uvedeny v tabulkovém přehledu, viz obrázek 9.6.

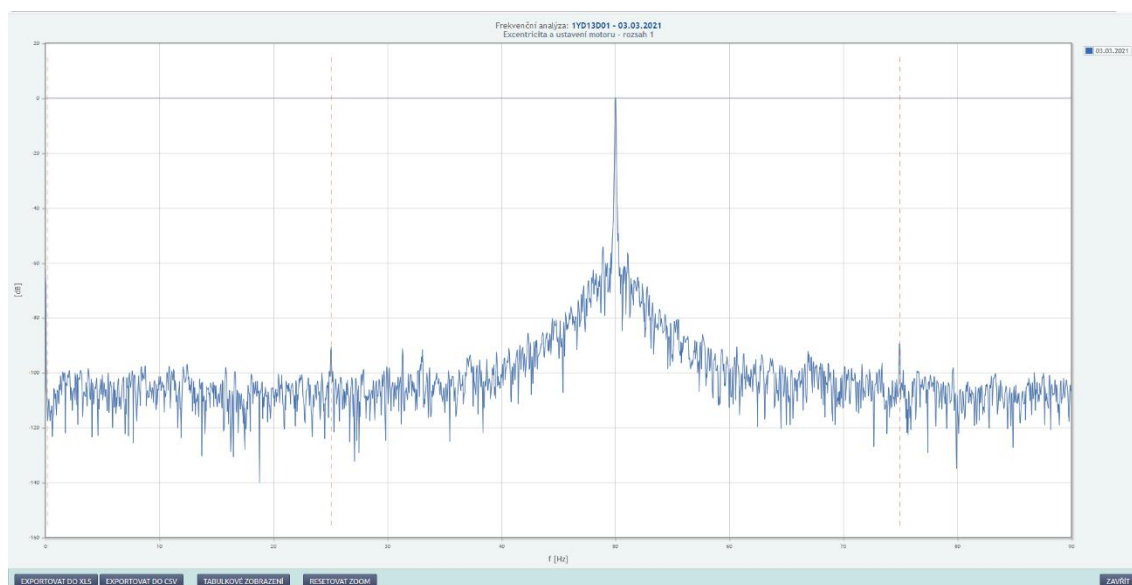
Ve spodní části jsou umístěna odkazová okna pro export dat do souboru .xls., .csv. a odkazové okno pro přechod do tabulkového přehledu charakteristických frekvencí.

Frekvenční spektrum lze libovolně přibližovat. To lze učinit kliknutím levého tlačítka myši do požadované části spektra a označení oblasti přiblížení podržením tlačítka. Pro resetování přiblížení slouží tlačítko „RESETOVAT ZOOM“ ve spodní části obrazovky.

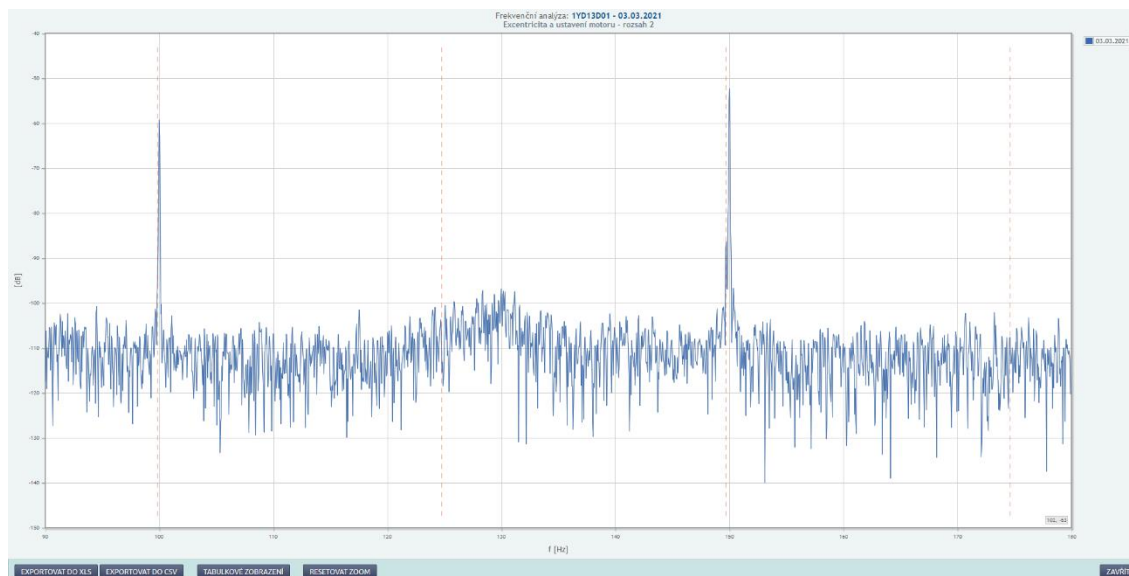
Tlačítkem „ZAVŘÍT“ dojde k ukončení prohlížení obrazovky a návrat do obrazovky s přehledem hledaných motorů.



Obrázek 9.8 Obrazovka frekvenčního spektra pro poruchu rotorových tyčí



Obrázek 9.9 Obrazovka frekvenčního spektra pro excentricitu a ustavení motoru – rozsah 1



Obrázek 9.10 Obrazovka frekvenčního spektra pro excentricitu a ustavení motoru – rozsah 2

9.3 Porovnávání jednotlivých měření

Velmi důležitá funkce z hlediska sledování a vyhodnocování vývoje trendu charakteristických frekvencí jednotlivých typů poruch je možnost překrývání frekvenčních spekter analyzovaného motoru za jednotlivá měřicí období. Zobrazení výsledků měření požadovaného vzorku asynchronních motorů lze provést následovně. V levé části obrazovky s přehledem hledaných motorů (obrázek 9.2) se pomocí zatrhávacích oken vyberou požadovaná měření. Následně se navolením tlačítka v pravém kraji lišty zobrazí nabídka požadovaných funkcí. Náhled obrazovky s vybraným vzorkem měření, detail tlačítka pro zobrazení nabídky požadovaných funkcí a detail nabídky požadovaných funkcí je uveden v obrázku 9.11.

Frekvenční analýza asynchronních motorů

Filtrovací označení

Vlečte sem: EDU

Blok: všechny označení...

Měřené zařízení: YD111001 X | YD12001 X | YD13001 X | YD14001 X | YD15001 X | YD16001 X

Výrobní C. motoru: Výrobní číslo motoru...

Měřeno od: Měřeno do: Ověřit

ZOBRAZIT

Menu:

- Zobrazit poruchu rotorových tyčí označených
- Tabulkové zobrazení frekv. spekter označených
- Zobrazit exc. a ust. motoru označených - rozsah 1
- Zobrazit exc. a ust. motoru označených - rozsah 2
- Tabulkové zobrazení frekv. spekter označených

Číslo	Zařízení	Popis	Vyrobce	První měření	Měřeno v	Vz. motoru	Im. výkon	Im. napětí	Im. proud	Im. výkon	Im. výkon účinný	Průměrná rychlost	Průměrná rychlost	Průměrná rychlost
YD13001	Hlavní cirkulaci čerpadla	0	2021	03.03.2021 12:24	32	1600 1/1	6 000 V	183 A	0.5 %	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1
YD14001	Hlavní cirkulaci čerpadla	0	2021	01.03.2021 11:21	34	1600 1/1	6 000 V	183 A	0.5 %	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1
YD15001	Hlavní cirkulaci čerpadla	0	2021	23.02.2021 15:27	31	1600 1/1	6 000 V	183 A	0.5 %	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1
YD14001	Hlavní cirkulaci čerpadla	0	2021	23.02.2021 15:27	34	1600 1/1	6 000 V	183 A	0.5 %	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1
YD12001	Hlavní cirkulaci čerpadla	0	2021	23.02.2021 14:57	32	1600 1/1	6 000 V	183 A	0.5 %	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1
YD13001	Hlavní cirkulaci čerpadla	0	2021	23.02.2021 14:57	35	1600 1/1	6 000 V	183 A	0.5 %	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1	1 493 1/1

Obrázek 9.11 Detail rozbalovacího pole s požadovanými funkcemi a detail rozbalovacího tlačítka

9.3.1 Zobrazení poruchy označených měření

Pro zobrazení frekvenčního spektra pro jednotlivé druhy poruch označených měření se musí navolit jeden ze tří aktivních odkazů:

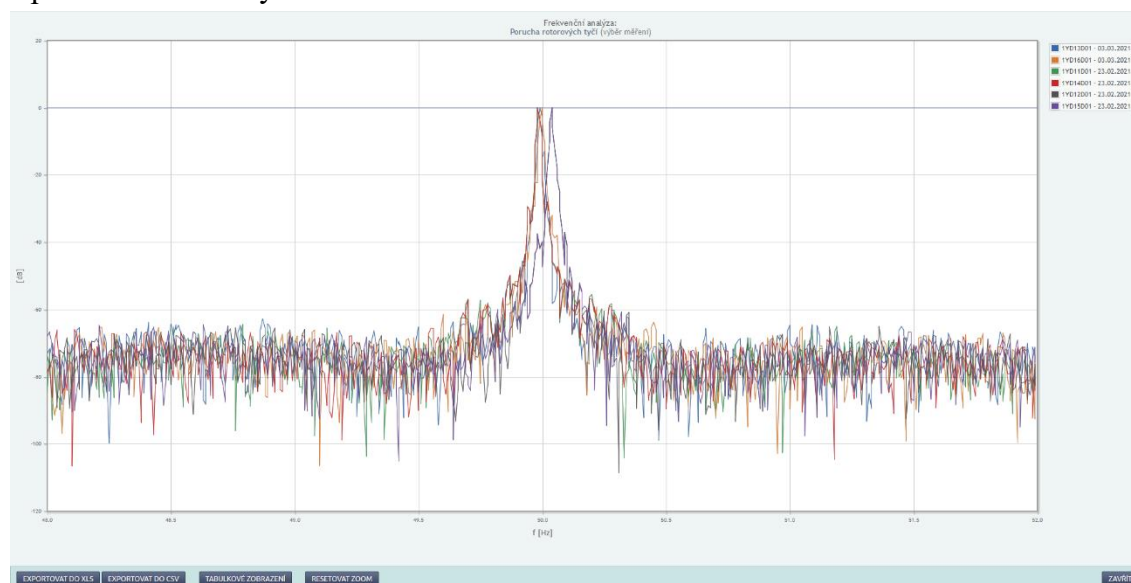
- „ZOBRAZIT PORUCHU ROTOROVÝCH TYČÍ OZNAČENÝCH“
- „ZOBRAZIT EXC. A UST. MOTORU OZNAČENÝCH – ROZSAH 1“
- „ZOBRAZIT EXC. A UST. MOTORU OZNAČENÝCH – ROZSAH 2“.

Dispozice rozložení jednotlivých obrazovek je totožná jako zobrazení frekvenčních spekter jednotlivých poruch v podkapitole 9.2.3. Jako příklad jsou na obrázcích 9.12 a 9.14 uvedeny obrazovky s poruchou rotorových tyčí.

Na obrázku 9.12 je uvedena obrazovka se šesti vykreslenými frekvenčními spektry. Legenda přiřazující barvu jednotlivých spekter k technologickému označení motoru s datem měření je zobrazena v pravém horním rohu obrazovky. Kvůli přehlednosti nejsou v těchto frekvenčních spektrech zvýrazněny charakteristické frekvence červenou čárkovanou čarou.

Stejně jako u obrazovek v podkapitole 9.2.3 je možné zobrazená data exportovat do souboru xls. nebo csv., přibližovat vybranou část spektra nebo přejít do tabulkového zobrazení charakteristických frekvencí pro jednotlivé průběhy, viz. obrázek 9.13.

Stisknutím tlačítka „ZPĚT“ dojde k ukončení obrazovky a návrat na obrazovku s přehledem hledaných měření.

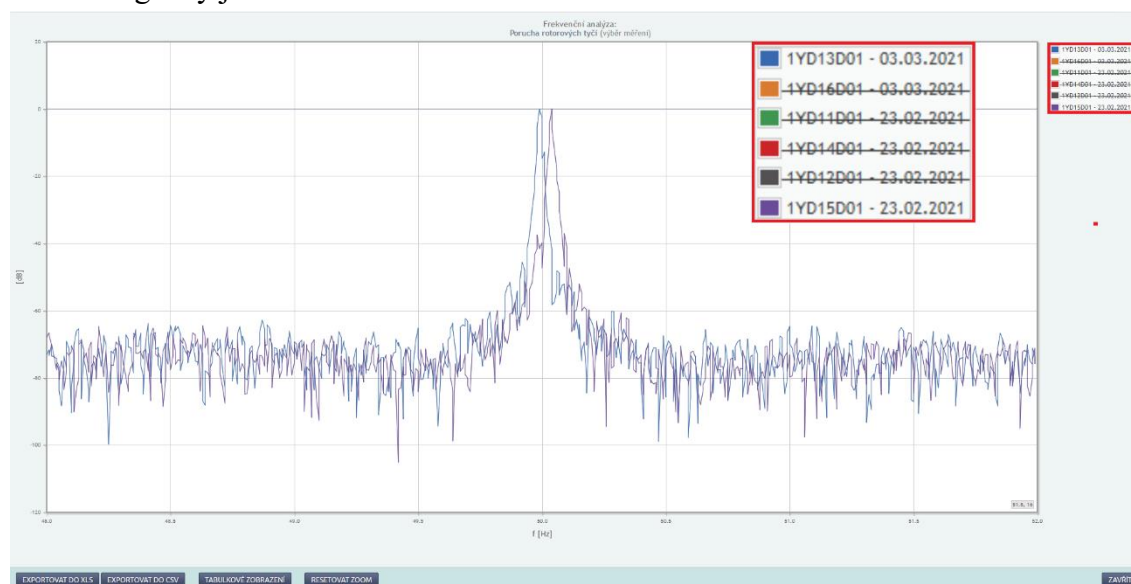


Obrázek 9.12 Obrazovka frekvenčních spekter pro poruchu rotorových tyčí – vykreslena spektra všech označených měření

Tabulkové zobrazení frekvenčních spekter (porucha rotorových tyčí)					
TYD13001 03.03.2021 10:24	TYD14001 03.03.2021 10:23	TYD15001 23.02.2021 10:27	TYD14001 23.02.2021 10:27	TYD12001 23.02.2021 10:27	TYD15001 23.02.2021 10:27
Char. frekvence [Hz]	Char. frekvence [Hz]	Char. frekvence [Hz]	Char. frekvence [Hz]	Char. frekvence [Hz]	Char. frekvence [Hz]
48.34	48.25	48.53	48.43	48.51	48.44
48.67	48.60	48.82	48.74	48.84	48.76
49.00	48.95	49.11	49.05	49.14	49.08
49.33	49.38	49.40	49.36	49.44	49.40
49.66	49.65	49.69	49.67	49.74	49.71
50.32	50.35	50.27	50.29	50.34	50.36
50.65	50.70	50.56	50.60	50.64	50.68
50.98	51.05	50.85	50.91	50.94	51.00
51.31	51.40	51.14	51.22	51.24	51.32
51.64	51.75	51.43	51.53	51.54	51.64

Obrázek 9.13 Obrazovka s tabulkovým zobrazením charakteristických frekvencí

Pokud by uživatel chtěl v rámci vybraného vzorku měření určit frekvenční spektrum nebo spektra dočasně skrýt, stačí levým tlačítkem myši navolit konkrétní měření v legendě. Tím dojde k jeho skrytí. Skryté frekvenční spektrum je označeno přeškrtnutím v oblasti legendy. Příklad obrazovky s dočasně skrytými průběhy frekvenčních spekter a detail legendy je uveden na obrázku 9.14.



Obrázek 9.14 Obrazovka frekvenčních spekter pro poruchu rotorových tyčí – vykreslená spektra pouze dvou měření z šesti označených měření

10. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem nastavení limit a kritérií, podle kterých jsou hodnoceny poruchy a závady asynchronních motorů za použití diagnostické metody frekvenční analýzy statorového proudu. Před zpracováváním práce samotné jsem byl přítomen několika měření záznamů proudů asynchronních motorů společně s pracovníky firmy TES s.r.o. Byly mi poskytnuty nutné informace k provozu záznamové měřicí aparatury včetně vyhodnocovací aplikace TEGraf. Ve spolupráci s pracovníky ČEZ, a.s. jaderné elektrárny Dukovany jsem shromáždil všechny potřebné technické parametry posuzovaných asynchronních motorů, včetně vybrané provozní dokumentace. Pracovníci firmy TES s.r.o. mě dále seznámili s vyhodnocovací aplikací MCSA-AS-TES využívající k vyhodnocení aktuálního stavu asynchronních motorů frekvenční analýzu statorového proudu.

Informace potřebné pro správné pochopení provozních stavů asynchronních strojů jsou uvedeny v úvodní teoretické části. Součástí teoretické části je také stručný popis základních principů metody frekvenční analýzy statorového proudu.

Hlavní část práce je zaměřená na stanovení limit a kritérií hodnocení výsledků frekvenční analýzy statorového proudu asynchronních motorů. Před zpracováním prvotního návrhu jsem prostudoval zejména předchozí provedené frekvenční analýzy a dostupnou zahraniční literaturu. Stávající nevyhovující dvoustupňové hodnocení používané v protokolech bylo potřeba nahradit vícestupňovým hodnocením, aby v případě zhoršeného stavu motorů bylo možné aplikovat různé stupně technicko – organizačních opatření. Stejně požadavky na vícestupňové hodnocení byly požadovány také metodickými postupy ze strany ČEZ, a.s.

Na základě uvedených poznatků vznikl prvotní návrh limit a kritérií hodnocení výsledků frekvenční analýzy statorového proudu asynchronních motorů. Tento návrh byl ověřován na vybrané skupině asynchronních motorů Jaderné elektrárny Dukovany, které byly analyzovány v roce 2020. Z analyzovaných záznamů vyplynul požadavek na optimalizaci některých kritérií. Zároveň však bylo zjištěno, že vybraná skupina asynchronních motorů Jaderné elektrárny Dukovany nepokrývá všechny stupně klasifikace, a proto upravená kritéria byla ověřována na skupině asynchronních motorů, která byla rozšířena o skupinu motorů Jaderné elektrárny Temelín. I když rozšíření posuzované skupiny asynchronních motorů bylo do značné míry nad rámec diplomové práce, bylo nutné alespoň minimálně ověřit všechny stupně klasifikace a dále zjistit nutné podklady pro detailnější rozpracování technicko – organizačních opatření v případě diagnostikovaného rozvoje poruchových stavů motorů. V konečném důsledku byly ověřovány optimalizované limity a kritéria na 471 asynchronních motorech z obou jaderných elektráren. Výstupem posuzování rozšíření skupiny asynchronních motorů byly limity a kritéria, které byly v souladu se zadáním diplomové práce a které byly

aplikované na vybraných asynchronních motorech Jaderné elektrárny Dukovany za rok 2020. Výsledné porovnání je uvedené v kapitole 7.

V téže kapitole je uveden také návrh pravidelného hodnocení stavu asynchronních motorů. Z důvodu každoročního posuzování velkého počtu motorů, případně také opakovaného hodnocení příčinou zhoršených parametrů, je součástí diplomové práce proveden návrh šablony protokolu (příloha A). Pro komplexní roční hodnocení posuzovaných motorů je součástí diplomové práce také návrh šablony technické zprávy (příloha B). U uvedených dokumentů bylo před dokončením této diplomové práce ukončeno připomínkové řízení a staly se přílohou připravované nové revize metodiky ČEZ_ME_1152r01.

Pro potřeby operativního a přehledného průběžného sledování hodnocení aktuálního stavu posuzovaných asynchronních motorů bylo vytvořeno databázové zpracování dostupných záznamů ve webovém prostředí monitorovacího systému elektro Jaderné elektrárny Dukovany. Kromě uvedení všech důležitých technických parametrů asynchronních motorů, včetně technologického značení a výrobních čísel, byla i zde provedena klasifikace posuzovaných pohonů. Tyto informace jsou shrnuty v kapitole 9, kde je uveden také stručný uživatelský návod.

Zpracovaná diplomová práce respektovala požadavky zadání a jejich splnění je doloženo praktickou realizací nejen aplikovatelným optimalizovaným návrhem limit a kritérií hodnocení výsledků frekvenční analýzy asynchronních motorů, ale také realizací aktivních obrazovek databázového prostředí webového rozhraní monitorovacího systému elektro Jaderné elektrárny Dukovany. Přínosem diplomové práce kromě splnění všech bodů zadání je dále:

- Praktické ověření návrhu limit a kritérií hodnocení výsledků frekvenční analýzy na rozšířené dostupné skupině asynchronních motorů obou jaderných elektráren
- Návrh a schválení šablon protokolu a zprávy ročního komplexního hodnocení formou připomínkového řízení
- Zavedení nových principů zobrazování databázového prostředí ve webovém rozhraní monitorovacího systému elektro Jaderné elektrárny Dukovany
- Podíl na tvorbě nové revize metodiky diagnostiky elektrických veličin točivých elektrických strojů ČEZ_ME_1152r01.

Realizací praktických výstupů diplomové práce byla diagnostika proudu statoru asynchronních motorů pomocí frekvenční analýzy začleněna do širokého souboru diagnostik prediktivní údržby komponent jaderných elektráren.

LITERATURA

- [1] CHMELÍK, Karel. Stejnosměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-707-8857-7.
- [2] G. N., Petrov. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje – Synchronní stroje. Praha: Československá akademie věd, 1982.
- [3] SIKORA, M. Inovace systému chlazení točivých elektrických strojů s využitím CFD metod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 182 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.
- [4] STÝSKALA, Vítězslav; DUDEK, Jan. Elektrické stroje : Asynchronní motory. VSB [online]. 2007, 1, [cit. 2020-12-02]. Dostupný z WWW: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf
- [5] Elektrické stroje. Brno, 2016. Skriptum. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [6] KOCMAN, Stanislav. Asynchronní stroje [online]. Katedra obecné elektrotechniky VŠB Ostrava, 2002 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/asskriptum.pdf>
- [7] RUDOLF, Ladislav. Asynchronní motory. Elektrické stroje a přístroje [online]. Ostrava: Pedagogická fakulta Ostravská univerzita, 2016 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://projekty.osu.cz/irp2016/Asynchronni%20motory.pdf>
- [8] Základní teorie a principy asynchronních strojů. Třebíč: TES, 2019.
- [9] KOCMAN, Stanislav. ASYNCHRONNÍ STROJE [online]. Ostrava, 2002 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1998973-2002-katedra-obecne-elektrotechniky-fei-vsb-tu-ostrava-ing-stanislav-kocman.html>. Skriptum. Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava.
- [10] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2
- [11] Klusáček, J. Návrh a analýza vysokorychlostního asynchronního motoru, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [12] Asynchronní stroje. SPŠ elektrotechniky a informačních technologií [online]. Dobruška: SPŠ elektrotechniky a informačních technologií, 2006 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/AM.pdf>
- [13] MAREČEK, Oto a Miloš KAŠKA. DIAGNOSTIKA STAVU VN ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ MĚŘENÍM A ANALÝZOU ELEKTRICKÝCH VELIČIN. In: DEZ 2017: Diagnostika elektrických zařízení. Třebíč: TES, 2017.
- [14] KARBAN, Pavel. *KTE/TEVS - Rychlá Fourierova transformace* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12_prednaska.pdf. Katedra teoretické elektrotechniky Fakulta elektrotechnická Západočeská univerzita v Plzni.

- [15] SOKANSKÝ, Karel. *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter* [online]. Ostrava [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/24778479-Diagnostika-vybranych-poruch-asynchronnich-motoru-pomoci-proudovych-spekter.html>. VŠB – TU Ostrava, FEL.
- [16] KOLEKTIV AUTORŮ. ČEZ, A. S., ÚTVAR PŘÍPRAVA JE. Elektrická část JE VVER 440: II. část. 2014.
- [17] VÁCLAV, Kořený. Diagnostika elektrických veličin vn točivých elektrických strojů: PROCES: V02.07 Zajištění technické kvality JE. IDENTIFIKAČNÍ KÓD: ČEZ_ME_1152r00z1. Praha, 2019.
- [18] PNE 33 0000-6: Obsluha a práce na elektrických zařízeních pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie. 3. vydání. 2018.
- [19] ŠVESTKA, Jiří. Fotografie průběhu měření metodou MCSA. Jaderná elektrárna Dukovany: TES, 2020.
- [20] Diagnostika rotačních strojů. *Tes, s.r.o.* [online]. Třebíč: Yashica-digital [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.tes.eu/produkt/diagnostika-rotacnich-stroju/>
- [21] P. Pillay and Z. Xu, "Motor current signature analysis," *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, San Diego, CA, USA, 1996, pp. 587-594 vol.1, doi: 10.1109/IAS.1996.557096.
- [22] Nandi, S.; Ahmed, S.; Toliyat, H.A., "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," in *Energy Conversion*, IEEE Transactions on , vol.16, no.3, pp.253-260, Sep 2001
- [23] JAŠA, Radomil. Monitorovací systém elektro: TES-Z-19-315. TES, s.r.o., 2019

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

<i>AM</i>	Asynchronní motor
<i>BQDV</i>	Čerpadlo chladicí cirkulační vody
<i>CJ</i>	Centrální jednotka
<i>ČPV</i>	Čerpadlo požární vody
<i>CSV</i>	Comma separated values
<i>EDU</i>	Jaderná elektrárna Dukovany
<i>ENČ</i>	Elektronapájecí čerpadlo
<i>ETE</i>	Jaderná elektrárna Temelín
<i>FFT</i>	Rychlá Fourierova transformace
<i>HCC</i>	Hlavní cirkulační čerpadlo
<i>HNČ</i>	Havarijní napájecí čerpadlo
<i>HVB</i>	Hlavní výrobní blok
<i>HVB1</i>	Hlavní výrobní blok č. 1
<i>HVB2</i>	Hlavní výrobní blok č. 2
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>JE</i>	Jaderná elektrárna
<i>KČ1</i>	Kondenzátní čerpadlo I. stupně
<i>KČ2</i>	Kondenzátní čerpadlo II. stupně
<i>MCSA</i>	Frekvenční analýza statorového proudu (Motor Current Signature Analysis)
<i>MTP</i>	Měřicí transformátor proudu
<i>NTK</i>	Nízkotlaký kompresor
<i>SHNČ</i>	Superhavarijní napájecí čerpadlo
<i>TJ</i>	Vysokotlaké havarijní doplňovací čerpadlo
<i>TK</i>	Čerpadlo normálního doplňování primárního okruhu
<i>TVD</i>	Čerpadlo technické vody důležité
<i>TVN</i>	Čerpadlo technické vody nedůležité
<i>VS</i>	Vlastní spotřeba
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické
<i>VV</i>	Vyvedení výkonu

Symbols:

A_f	Úroveň signálu dané frekvence	(dB)
$\cos \varphi$	Účinník	(-)

f	Frekvence sítě	(Hz)
f_{DYN}	Charakteristická frekvence dynamické excentricity	(Hz)
f_r	Frekvence rotoru	(Hz)
f_{SO}	Synchronní otáčková frekvence	(Hz)
f_{STAT}	Charakteristická frekvence statické excentricity	(Hz)
f_v	Charakteristická frekvence pro poruchu rotorových tyčí	(Hz)
I_0	Proud naprázdno	(A)
I_1	Napájecí proud statorového vinutí	(A)
I_{2l}	Proud procházející rotorovým vinutím přepočítaný na závity vinutí statoru	(A)
I_f	Proud příslušné frekvence	(A)
I_{Fe}	Proud reprezentující ztráty v magnetizačním obvodu	(A)
I_n	Jmenovitý proud	(A)
I_μ	Magnetizační proud	(A)
M	Moment na hřídeli motoru	(Nm)
M_{max}	Moment zvratu	(Nm)
M_n	Jmenovitý moment	(Nm)
M_z	Záběrný moment	(Nm)
M_{zat}	Zátěžný moment	(Nm)
n_n	Jmenovité otáčky	(ot/min)
n_r	Otáčky magnetického pole rotoru	(ot/min)
n_s	Synchronní otáčky	(ot/min)
P	Elektrický výkon	(W)
p	Počet pólových dvojic	(-)
R_l	Odpor statorového vinutí	(Ω)
$R_{2l/s}$	Celkový činný odpor rotoru přepočítaný na počet závitů statorového vinutí	(Ω)
R_{Fe}	Odpor reprezentující ztráty magnetizačního obvodu	(Ω)
s	Skluz	(-)
s_{max}	Maximální skluz	(-)
U_l	Napájecí napětí statorového vinutí	(V)
U_i	Indukované napětí ve vinutí stroje	(V)
U_n	Jmenovité napětí	(V)
X_μ	Magnetizační reaktance	(Ω)
$X_{\sigma l}$	Rozptylová reaktance statorového vinutí	(Ω)
$X_{\sigma 2l}$	Rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočítaná na počet závitů vinutí statoru	(Ω)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VZOROVÝ PROTOKOL O ZKOUŠCE.....	84
PŘÍLOHA B - VZOROVÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA	90

Příloha A - Vzorový protokol o zkoušce



PROTOKOL O ZKOUŠCE

Název činnosti:	Frekvenční analýza statorových proudů asynchronního motoru
-----------------	--

Zařízení:	VYPLNIT	Vývod:	VYPLNIT
Datum měření	VYPLNIT	Čas měření	VYPLNIT
Číslo prac. příkazu:	VYPLNIT	Datum provedení činnosti:	VYPLNIT

Přílohy:

Seznam příloh	Listů
Příloha č. VYPLNIT: Uvést název přílohy	
<i>Poznámka: V příloze uveďte průběh měřeného proudu asynchronního motoru a jednotlivé spektrogramy vyhodnocovaných oblastí.</i>	

Provedené činnosti:

Číslo operace	Popis činnosti	Provedeno*	Vyhovuje*
01.	Realizace měření proudu za ustáleného chodu asynchronního motoru – provedení záznamů systémem MOSAD®-6 v MMÚ a export záznamů dat	Ano / Ne	Ano / Ne
02.	Realizace měření proudu za ustáleného chodu asynchronního motoru – zpracování a kontrola záznamů v prostředí TEGraf	Ano / Ne	Ano / Ne
03.	Ukončení realizace měření	Ano / Ne	Ano / Ne
04.	Zpracování a archivace záznamů dat, úprava formátu dat do SW pro vyhodnocení FA	Ano / Ne	Ano / Ne
05.	Načtení záznamů dat do SW pro vyhodnocení FA a provedení výběru záznamu dat pro vyhodnocení FA (maximální zatížení při ustáleném chodu s minimálním rušením HDO)	Ano / Ne	Ano / Ne
06.	Načtení vybraného záznamu dat do SW pro vyhodnocení FA	Ano / Ne	Ano / Ne
07.	Nastavení konfigurace a parametrizace SW na daný typ asynchronního motoru, kontrola parametrů měřeného motoru	Ano / Ne	Ano / Ne
08.	Vyhodnocení elektrických a mechanických parametrů asynchronního motoru	Ano / Ne	Ano / Ne
09.	Analýza frekvenčních spekter proudu asynchronního motoru	Ano / Ne	Ano / Ne

Číslo operace	Popis činnosti	Provedeno*	Vyhovuje*
10.	Analýza pásem frekvenčního spektra rotorových tyčí asynchronního motoru	Ano / Ne	Ano / Ne
11.	Analýza pásem frekvenčního spektra excentricity a ustavení asynchronního motoru	Ano / Ne	Ano / Ne
12.	Analýza pásem frekvenčního spektra vinutí statoru asynchronního motoru	Ano / Ne	Ano / Ne
13.	Vyhotovení protokolu	Ano / Ne	Ano / Ne

* Nevyhovující škrtnout

Parametry motoru:

Parametr	Hodnota
Výrobní číslo	VYPLNIT
Jmenovitý výkon (kW)	VYPLNIT
Jmenovitý proud (A)	VYPLNIT
Frekvence (Hz)	VYPLNIT
Jmenovité napětí (kV)	VYPLNIT
cos φ (-)	VYPLNIT
Nominální otáčky (ot/min)	VYPLNIT
Synchronní otáčky (ot/min)	VYPLNIT
Skluz (%)	VYPLNIT
Počet pólových dvojic (-)	VYPLNIT
Účinnost (%)	VYPLNIT
Počet rotorových tyčí (-)	VYPLNIT
Počet statorových drážek (-)	VYPLNIT

Použité měřicí přístroje:

Měřicí přístroj	Typ	Evidenční (výrobní) číslo
Mobilní monitorovací ústředna MMU-k	MOSAD [®] -6	VYPLNIT
Klešťový transformátor	PK-200	VYPLNIT

Poznámky:

Číslo operace	Poznámka

Vyhodnocení měření:

Aktuální hodnota proudu při provozním zatížení motoru dosahovala VYPLNIT . Při uvažovaném nominálním proudu VYPLNIT dosahovalo provozní zatížení VYPLNIT % I_N .
Skluz motoru při nominálním výkonu udávaný výrobcem je VYPLNIT %, což odpovídá VYPLNIT ot/min. Během provozu však motor pracuje při nižším zatížení se skluzem okolo VYPLNIT %, což odpovídá přibližně VYPLNIT ot/min.
Detekce poruch rotorových tyčí: Uvést případný výskyt specifických frekvencí pro poruchu rotorových tyčí.
Detekce excentricity a ustavení motoru: Uvést případný výskyt specifických frekvencí pro excentricitu a ustavení motoru.
Sledování trendů frekvenčních spekter statorových proudů: Uvést výsledek porovnání aktuálního frekvenčního spektra s frekvenčním spektrem z předchozího měření.

Hodnocení zařízení – kritéria přijatelnosti:

Hodnocení zařízení		Kritéria přijatelnosti
A VÝBORNÝ	-	<ul style="list-style-type: none"> - úrovně charakteristických frekvencí pro rotorové tyče v oblasti šumu, - úrovně charakteristických frekvencí pro excentricitu a ustavení motoru v blízkosti oblasti šumu, - při sledování trendů nezjištěny výrazné odchylky, - úrovně frekvenčního šumu je nízká.
B VYHOVUJÍCÍ	X	<ul style="list-style-type: none"> - úrovně charakteristických frekvencí pro rotorové tyče jsou znatelné, - úrovně charakteristických frekvencí pro excentricitu a ustavení motoru jsou znatelné, - při sledování trendů nezjištěny výrazné odchylky, - úroveň frekvenčního šumu je zvýšená.
C USPOKOJIVÝ	-	<ul style="list-style-type: none"> - úrovně charakteristických frekvencí pro rotorové tyče jsou výrazné, - úrovně charakteristických frekvencí pro excentricitu a ustavení motoru jsou výrazné, - při sledování trendů zjištěny výrazné odchylky.
D NEUSPOKOJIVÝ	-	<ul style="list-style-type: none"> - úrovně charakteristických frekvencí pro rotorové tyče jsou velmi výrazné, - úrovně charakteristických frekvencí pro excentricitu a ustavení motoru jsou velmi výrazné, - při sledování trendů zjištěny výrazné odchylky.
E NEVYHOVUJÍCÍ	-	<ul style="list-style-type: none"> - úrovně charakteristických frekvencí pro rotorové tyče jsou dominantní, - úrovně charakteristických frekvencí pro excentricitu a ustavení motoru jsou dominantní, - při sledování trendů zjištěny výrazné odchylky.

Poznámka: pro výběr hodnocení zařízení je rozhodující nejhorší zjištěné dílčí kritérium přijatelnosti.

Dle výsledného hodnocení označte křížkem v prostředním sloupci výše uvedené tabulky příslušnou kategorii hodnocení.

Stav zařízení:

Dle výsledného hodnocení doplnit slovní popis hodnocení

Poznámka:

- A – Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení.*
- B – Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, úrovně hodnocených frekvenčních pásem nemají vliv na provozuschopnost zařízení.*
- C – Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, nutné však sledovat vývoj hodnocených frekvenčních pásem.*
- D – Zařízení schopno provozu pouze v omezeném rozsahu, pro zjištění příčiny závady nutnost provedení dalších diagnostických kontrol.*
- E – Stav zařízení neslučitelný s provozem ani v omezeném rozsahu, hrozí trvalé poškození zařízení.*

Vedoucí práce: **VYPLNIT**

Jméno podpis

Pracovníci: **VYPLNIT**

Jména

Kontroloval: **VYPLNIT** **VYPLNIT**
Datum jméno podpis

Příloha B - Vzorová technická zpráva



Vyhodnocení provozu motorů soustrojí 6kV metodou MCSA na EDU za období VYPLNIT

Datum schválení: VYPLNIT	Počet stran: VYPLNIT	Výtisk: VYPLNIT
Vypracoval: VYPLNIT	Zkontroloval: VYPLNIT	Schválil: VYPLNIT
Revize: VYPLNIT	Datum revize: VYPLNIT	Revizi provedl: VYPLNIT
Zakázka číslo: VYPLNIT	Archivní číslo: VYPLNIT	Rozdělovník: Výtisk: Příjemce: VYPLNIT VYPLNIT
Uloženo v souboru: VYPLNIT		

OBSAH

OBSAH	2
SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK	4
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	5
LITERATURA	6
1 ÚVOD	7
2 TEORETICKÝ POPIS DIAGNOSTICKÉ METODY	8
2.1 POSTUP APLIKACE MCSA	9
2.2 PORUCHY ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ DETEKOVANÉ MCSA	9
2.2.1 <i>Mechanické poruchy</i>	9
2.2.2 <i>Elektrické poruchy</i>	11
3 MĚŘÍCÍ METODA A PRŮBĚH MĚŘENÍ	12
3.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	12
3.2 PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ	13
3.3 POPIS MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ METODOU MCSA	13
4 PŘEHLED VYHODNOCOVANÝCH MOTORŮ	14
4.1 NÁZEV SOUSTROJÍ	14
5 PŘEHLED PROVEDENÝCH MĚŘENÍ	15
6 ANALÝZA PROVOZNÍHO STAVU VYBRANÝCH MOTORŮ	16
6.1 ANALÝZA TECHNICKÉHO STAVU MOTORU VYPLNIT	16
7 ZÁVĚR	17
7.1 DOPORUČENÍ	19

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Přehled excentricit rotoru [1]	10
6.1	Trend frekvenčních spekter rotorových tyčí motoru VYPLNIT	16
6.2	Trend frekvenčních spekter excentricity a ustavení rotoru motoru VYPLNIT	16

SEZNAM TABULEK

4.1	Parametry asynchronních motorů VYPLNIT.....	14
5.1	Přehled provedených měření pro motory VYPLNIT	15
7.1	Soupis kritérií pro určení aktuálního stavu analyzovaných asynchronních motorů.....	17
7.2	Přehled aktuálních stavů analyzovaných asynchronních motorů.....	18

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

<i>EDU</i>	Jaderná elektrárna Dukovany
<i>FFT</i>	Rychlá Fourierova transformace
<i>HVB</i>	Hlavní výrobní blok
<i>MCSA</i>	Frekvenční analýza statorového proudu (Motor Current Signature Analysis)
<i>RB</i>	Reaktorový blok
<i>SJZ</i>	Systém jednotného značení
<i>SW</i>	Software
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické

Symboly:

A_f	Úroveň signálu dané frekvence	(dB)
f	Frekvence sítě	(Hz)
f_{DYN}	Charakteristická frekvence dynamické excentricity	(Hz)
f_r	Frekvence rotoru	(Hz)
f_{SO}	Synchronní otáčková frekvence	(Hz)
f_{STAT}	Charakteristická frekvence statické excentricity	(Hz)
f_v	Charakteristická frekvence pro poruchu rotorových tyčí	(Hz)

LITERATURA

- [1] MAREČEK, Oto a Miloš KAŠKA. DIAGNOSTIKA STAVU VN ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ MĚŘENÍM A ANALÝZOU ELEKTRICKÝCH VELIČIN. In: DEZ 2017: Diagnostika elektrických zařízení. Třebíč: TES, 2017.
- [2] SOKANSKÝ, Karel. *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter* [online]. Ostrava [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/24778479-Diagnostika-vybranych-poruch-asynchronnich-motoru-pomoci-proudovych-spekter.html>. VŠB – TU Ostrava, FEI.
- [3] VÁCLAV, Kořený. Diagnostika elektrických veličin vn točivých elektrických strojů: PROCES: V02.07 Zajištění technické kvality JE. IDENTIFIKAČNÍ KÓD: ČEZ_ME_1152r00z1. Praha, 2019.
- [4] PNE 33 0000-6: Obsluha a práce na elektrických zařízeních pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie. 3. vydání. 2018.
- [5] Nandi, S.; Ahmed, S.; Toliyat, H.A., "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," in Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.16, no.3, pp.253-260, Sep 2001

1 ÚVOD

Předmětem plnění dle smlouvy dodavatele č. **VYPLNIT** a objednatele č. **VYPLNIT** je provedení analýzy chování asynchronních motorů soustrojí 6kV sledovaných metodou MCSA v průběhu období **VYPLNIT** na Jaderné elektrárně Dukovany. Na základě výsledků chování asynchronních motorů (zhodnocení stavu motoru a dlouhodobého trendu hodnocení stavu motoru) v průběhu období **VYPLNIT** je provedeno shrnutí aktuálního stavu jednotlivých motorů.

2 TEORETICKÝ POPIS DIAGNOSTICKÉ METODY

Frekvenční analýza statorových proudů asynchronních motorů, též nazývaná Motor Current Signature Analysis (MCSA), je diagnostická metoda umožňující detekci možné poruchy na rotoru a statoru asynchronních motorů. Hlavní předností této metody je spolehlivá analýza stavu asynchronního motoru prováděná za skutečných provozních podmínek bez požadavku na odstavení soustrojí. [1]

Frekvenční analýza statorových proudů je založena na principu frekvenční analýzy napájecího statorového proudu daného asynchronního motoru při zatížení. Uvažujme asynchronní motor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz. V proudovém frekvenčním spektru takového motoru se vykytuje zejména první harmonická a případně procentuálně její násobky, přičemž výraznější jsou násobky liché harmonické (z důvodu rozložení vinutí v drážkách a vlivem změny vzduchové mezery vůči drážkám). Pokud bychom uvažovali asynchronní motor s poruchou statoru nebo rotoru, byly by tyto poruchy v proudovém frekvenčním spektru daného motoru detekovány jako charakteristické frekvence rozdílné od harmonických frekvencí. Hodnoty charakteristických frekvencí se odvíjejí od konstrukčního provedení daného asynchronního motoru. Hodnoty v proudovém frekvenčním spektru se udávají v decibelech (dB). Metoda vyhodnocování analyzovaného motoru spočívá v porovnávání první harmonické amplitudy v proudovém frekvenčním spektru s ostatními amplitudami charakteristických frekvencí dle vztahu

$$A_f = 20 \cdot \log \cdot \left(\frac{I_f}{I_{50Hz}} \right), \quad (2.1)$$

kde I_f je proud příslušné frekvence a A_f je úroveň signálu téže frekvence normované podle proudu při 50 Hz. [1]

Toto vyjádření umožňuje zobrazovat výsledné signály v lineárních osách při současném amplitudovém potlačení signálu při 50 Hz a zároveň zdůraznění hledaných signálů při ostatních frekvencích. [1]

Zhoršení technického stavu, a s tím spojená závada, se detekuje, pokud amplitudový rozdíl první harmonické a dané charakteristické frekvence je menší než 40 dB. [1]

Frekvenční analýza statorových proudů se dle literatury [1] používá zejména na detekci následujících poruch:

- Statická a dynamická excentricita
- Porucha statorového vinutí
- Porucha rotorových tyčí
- Chyba ustavení motoru.

U asynchronních motorů provozovaných pod zatížením je vyžadována zejména analýza frekvenčních spekter statorového proudu za účelem detekce možné excentricity rotoru a možných poruch a závad rotorových tyčí. Ustavení motoru se projevuje zpravidla nárůstem charakteristických frekvencí velmi blízkých hodnotě charakteristických frekvencí excentricity daných mechanickou vazbou motoru a zátěží.

Z tohoto důvodu se provádí hodnocení excentricity rotoru a ustavení motoru zároveň. [1]

2.1 Postup aplikace MCSA

Postup provádění frekvenční analýzy statorových proudů udává literatura [1] a je založen na čtyřech základních krocích.

Prvním krokem je naměření průběhu okamžité hodnoty proudu protékajícího statorovým vinutím. Pro potřeby analýzy je dostačující měření proudu protékajícího jednou fází statorového vinutí. Aby byla zajištěna požadovaná přesnost výsledků metody, je nutné provádět měření v dostatečné kvalitě (vhodně zvolený měřicí rozsah, optimální vzorkovací frekvence a délka záznamu).

Druhým krokem metody je provedení frekvenční analýzy naměřených průběhů proudu pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) a provedení odhadu spektrálního výkonu naměřených průběhů.

Třetím krokem obnáší přiřazení konkrétních frekvenčních spekter k daným typům poruch a závad, která respektují konstrukční provedení daného asynchronního motoru, jeho štítkové hodnoty a aktuální zatížení.

Čtvrtým krokem analýzy je identifikace jednotlivých charakteristických frekvencí a jejich amplitudová úroveň vůči frekvenčnímu spektru za účelem posouzení závažnosti dané poruchy.

2.2 Poruchy asynchronních motorů detekované MCSA

Za provozu asynchronních motorů může docházet k různým poruchám. Metodou MCSA lze během provozu asynchronního motoru určité typy poruch detekovat. Tyto poruchy mohou být dvojího charakteru. Jedná se o poruchy mechanické a poruchy elektrické.

2.2.1 Mechanické poruchy

Jednou z nejčastějších mechanických závad u asynchronních motorů bývá nesprávné ustavení motoru vzhledem k poháněnému zařízení. Tato závada se projevuje jako nesouosost, která způsobuje ve spojení motoru a hnaného zařízení tření a deformace, které působí jako přídavné mechanické zatížení na ložiska i motor samotný. Další častou závadou bývá zejména dynamická nevyváženost rotoru nebo také uvolnění tělesa rotoru (magnetické plechy s konstrukcí klece) vůči hřídeli. Tyto závady způsobují vibrace a excentricity spojené s dynamickými změnami velikosti vzduchové mezery mezi rotorem a statorem asynchronního motoru [1].

2.2.1.1 Excentricita a ustavení motoru

Excentricita rotoru je dle literatury [1] úzce spojena s mechanickými poruchami rotoru a udává, v jaké vzájemné prostorové vazbě je umístění geometrického středu rotoru vůči geometrickému středu statoru a hřídele. Důsledkem excentricity je nadměrné namáhání motoru spojené se zvýšeným opotřebením ložisek vznikem vibrací. Dalším projevem

může být změna velikosti vzduchové mezery, a s tím spojená deformace točivého magnetického pole statoru i rotoru.

V praxi se uvažují dva typy excentricity rotoru – statická a dynamická.

Statická excentricita se vyznačuje tím, že rotor je vychýlený z geometrického středu statoru, ale otáčí se v jeho podélné ose. [1]

U dynamické excentricity jsou geometrické středy podélných os hřídele, rotoru a statoru rozdílné a obecně i nerovnoběžné. [1]

Zpravidla se u motorů využívaných v průmyslových odvětvích vyskytuje současně statická i dynamická excentricita. Určitá statická a dynamická excentricita vzniká při samotném výrobním procesu asynchronních motorů, kde je její míra ovlivněna přesností daného výrobního procesu. Dalšími příčinami mohou být například opotřebení ložisek, uvolnění rotoru vůči hřídeli nebo kritická rychlost způsobující rotorové kmity.[1]

Na obrázku 2.1 jsou uvedeny polohy a osy rotoru vůči ose motoru při jednotlivých druzích excentricity.



Obrázek 2.1 Přehled excentricit rotoru [1]

Vlivem statické excentricity dochází ke změnám vzduchové mezery mezi statorem a rotorem v závislosti na aktuální poloze rotoru. V místě, kde je vlivem excentricity způsobeno zmenšení vzduchové mezery, dochází k silnější interakci točivých magnetických polí statoru a rotoru. To má za následek vznik „postranních pásem“, která jsou posunuta vůči síťové frekvenci f o synchronní otáčkovou frekvenci f_{SO} . Charakteristická frekvence statické excentricity je dána vztahem

$$f_{STAT} = f \pm f_{SO} = f \pm \frac{f}{p}, \quad (2.2)$$

kde f je frekvence sítě, f_{SO} je synchronní otáčková frekvence a p je počet pólových dvojic stroje. [2]

Dynamická excentricita se projevuje obdobně jako statická excentricita změnou velikosti vzduchové mezery. Ovšem u dynamické excentricity vzniká mimo závislosti vzduchové mezery na poloze rotoru také závislost na otáčkách rotoru. To se projeví vznikem postranních pásem, která jsou posunuta od frekvence sítě f o otáčkovou frekvenci rotoru f_{rSO} . Charakteristická frekvence dynamické excentricity je popsána vztahem

$$f_{DYN} = f \pm f_{rSO} = f \pm (1 - s) \cdot f_{SO}, \quad (2.3)$$

kde f_{DYN} je charakteristická frekvence dynamické excentricity, f_{rSO} je otáčková

frekvence rotoru, f je frekvence sítě a f_{SO} je synchronní otáčková frekvence. [2]

2.2.2 Elektrické poruchy

Elektrické poruchy asynchronních strojů lze dělit na elektrické poruchy statoru a poruchy rotoru. Mezi statorové poruchy se řadí zejména tepelná degradace statorového vinutí. Tento nežádoucí jev může vést ke zkratu mezi statorovým vinutím a kostrou stroje nebo k mezizávitovému zkratu. [2]

Poruchami rotoru, které lze detekovat frekvenční analýzou statorového proudu, jsou poruchy rotorového vinutí nebo klece rotoru. U asynchronních motorů s vinutou kotvou je nejčastější poruchou opět tepelná degradace rotorového vinutí vedoucí až ke zkratu vinutí s kotvou nebo mezizávitovému zkratu. U klecových motorů může dojít k přerušení rotorové tyče nebo porušení spoje mezi stahovací konstrukcí klece a jednotlivou tyčí. To má za následek vzrůst přechodového odporu ve spojích klece nebo odporovou nesymetrii jednotlivých klecových tyčí. [1]

2.2.2.1 Porucha rotorových tyčí

V případě zvýšení přechodového odporu v jedné z tyčí, v horším případě při přerušení tyče, dochází k zániku symetrického točivého magnetického pole rotoru. To má za následek deformaci magnetického pole uvnitř vzduchové mezery, a s tím spojenou změnu průběhu statorového proudu, oteplení vinutí rotoru nebo vznik nežádoucích deformačních momentů. Charakteristická frekvence pro poruchu rotorových tyčí se projeví v oblasti, která je posunuta od základní harmonické dle vztahu

$$f_v = f \cdot (1 \pm 2 \cdot s), \quad (2.4)$$

kde f_v je charakteristická frekvence pro poruchu rotorových tyčí, f je frekvence sítě a s je skluz. [2]

3 MĚŘÍCÍ METODA A PRŮBĚH MĚŘENÍ

Při provádění analýzy jednotlivých asynchronních motorů bylo postupováno v souladu s metodikou ČEZ_ME_1152r00z01 a podnikovou normou PNE 33 0000 – 6 rev01 společnosti ČEZ, a.s., které jsou uvedeny v seznamu literatury pod číslem [3] a [4]. V této kapitole je popsána metoda měření, která byla prováděna pro získání požadovaných frekvenčních spektrogramů jednotlivých asynchronních motorů v areálu EDU.

Pro pořízení kvalitního záznamu okamžité hodnoty statorového proudu asynchronního motoru vhodného pro další zpracování metodou MCSA firma TES s.r.o. využívá mobilní měřicí ústředny MOSAD[®]-6. Měřicí ústředna MOSAD[®]-6 byla vyvinuta za účelem zaznamenání analogových a dvouhodnotových veličin při zkouškách elektrických zařízení jaderné elektrárny, a proto je vhodná i pro tato měření. Měřicí ústředna je v hardwarové a softwarové konfiguraci přizpůsobena k přímému měření analogových veličin, tj. osazena minimálně řídicí procesorovou kartou a vstupní analogovou měřicí kartou.

Pro zpracování a vyhodnocení záznamu okamžité hodnoty statorového proudu asynchronního motoru využívá firma TES s.r.o. softwarový produkt MCSA-AS-TES. Tento softwarový produkt byl vyvinut firmou TES s.r.o. ve spolupráci s UTEE VUT Brno.

Správnost a korektnost použité diagnostické metody (záznam a vyhodnocení dat) byla ověřena srovnávacím měřením se systémem SKF Dynamic Motor Analyzer EXP4000 používaným pro tuto diagnostiku firmou KONČAR – ELECTRICAL INDUSTRY Inc.

3.1 Podmínky měření

Z důvodu eliminace možného zkreslení analýzy MCSA při dynamické změně zatížení asynchronního motoru je nutné provádět měření elektrických parametrů pouze při ustáleném chodu asynchronního motoru. [3]

Druhou podmínkou je, aby byl asynchronní motor měřen vždy při běžném provozním zatížení, nebo v případě více provozních výkonových stupních měřen při podobných provozních režimech. Důvodem je vyšší míra přesnosti hodnocení a možné porovnání naměřených hodnot mezi typově podobnými pohony.[3]

3.2 Přístrojové vybavení

Pro získání vstupních dat pro aplikační software MCSA-AS-TES je nutné provést datový záznam proudu asynchronního motoru měřicí ústřednou MOSAD[®]-6 při ustáleném zatížení a chodu pohonu. Nejdůležitější součásti sestavy měřicí aparatury jsou:

- Klešťový měřicí transformátor proudu PK-200 (METRA Blansko)
- Mobilní měřicí ústředna MOSAD[®]-6 s nakonfigurovanou vzorkovací frekvencí 50 kHz a délkou záznamu 360 sekund
- PC se softwarovým produktem určeným ke konfiguraci, ovládání mobilní ústředny a zpracování a kompilaci formátu dat.

3.3 Popis měření a vyhodnocení metodou MCSA

V následujících bodech je stručně shrnutý standardní postup měření a navazující postup vyhodnocení pomocí metody MCSA za běžných provozních podmínek pohonu:

- Konfigurace a zapojení mobilní měřicí ústředny MOSAD[®]-6 včetně zapojení měřicích obvodů
- Záznam okamžité hodnoty statorového proudu jedné fáze měřeného motoru. Z důvodu kvality záznamu je rozhodující vhodný rozsah, délka záznamu a vzorkovací frekvence záznamu.
- Kontrola záznamu průběhu proudu a kompilace do formátu dat pro import do aplikace MCSA-AS-TES
- Provedení analýzy frekvenčních spekter metodou rychlé Fourierovy transformace pomocí aplikace MCSA-AS-TES
- Expertní analýza frekvenčních spektrogramů pro jednotlivé typy hledaných poruch a závad rotoru nebo statoru měřeného asynchronního motoru na základě aktualizovaných provozních parametrů motoru
- Vyhodnocení úrovně signálů charakteristických frekvencí ve frekvenčním spektru a posouzení závažnosti a typu případné poruchy asynchronního motoru pomocí postupů znalostí analýzy.

4 PŘEHLED VYHODNOCOVANÝCH MOTORŮ

Specifikace jednotlivých motorů 6kV jsou uvedeny v následujících podkapitolách. Pro správné určení charakteristických frekvencí je velmi důležité znát štítkové hodnoty měřených motorů a skutečný skluz motoru v čase měření.

4.1 Název soustrojí

Zde uveďte popis soustrojí a dle štítkových hodnot motoru doplňte následující tabulku.

Tabulka 4.1 Parametry asynchronních motorů **VYPLNIT**

Parametr	Hodnota
Technologické označení	
Jmenovitý výkon [kW]	
Jmenovitý proud [A]	
Frekvence [Hz]	
Jmenovité napětí [kV]	
$\cos \phi$ [-]	
Nominální otáčky [ot/min]	
Synchronní otáčky [ot/min]	
Skluz [%]	
Počet pólových dvojic [-]	

5 PŘEHLED PROVEDENÝCH MĚŘENÍ

Přehled provedených měření motorů 6kV a jejich výrobních čísel je uveden v Tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Přehled provedených měření pro motory **VYPLNIT**

SJZ	Měřicí období	Datum měření	V. č. motoru

6 ANALÝZA PROVOZNÍHO STAVU VYBRANÝCH MOTORŮ

V areálu EDU jsou měřeny a analyzovány metodou MCSA vybrané motory 6kV primárního a sekundárního okruhu. Analýza se provádí za období VYPLNIT. Při analýze stavu motoru se hodnotí dosažené hodnoty charakteristických frekvencí ve všech sledovaných oblastech a trend těchto hodnot se porovná s předchozími měřeními. Při absenci předchozího měření se projev motoru ve frekvenční oblasti kontroluje s typově podobnými motory. Hodnocení motorů se provádí na základě kritérií přijatelnosti, které jsou v souladu s metodikou ČEZ_ME_1152r00z01. Používaná kritéria a tabulkově znázorněná hodnocení aktuálního stavu jednotlivých motorů jsou uvedena v závěru této zprávy.

6.1 Analýza technického stavu motoru VYPLNIT

Uvést popis technického stavu analyzovaného motoru v oblasti rotorových tyčí.

Obrázek 6.1 Trend frekvenčních spekter rotorových tyčí motoru VYPLNIT

Uvést popis technického stavu analyzovaného motoru v oblasti excentricity a ustavení rotoru.

Obrázek 6.2 Trend frekvenčních spekter excentricity a ustavení rotoru motoru VYPLNIT

Uvést celkový popis technického stavu analyzovaného motoru.

7 ZÁVĚR

Hodnocení analyzovaných asynchronních motorů bylo provedeno na základě kritérií uvedených v tabulce 7.1, která jsou v souladu s metodikou ČEZ_ME_1152r00z01.

Tabulka 7.1 Soupis kritérií pro určení aktuálního stavu analyzovaných asynchronních motorů

Hodnocení zařízení	Kritéria přijatelnosti	Stav zařízení
A VÝBORNÝ	Úroveň frekvenčního šumu je nižší než - 60 dB, nevyskytují se jiné výrazné frekvenční složky proudu; úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí stejně jako úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je nevýrazná v blízkosti oblasti šumu. V porovnání s předchozím hodnocením nebyly zjištěny odchylky.	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení.
B VYHOVUJÍCÍ	Úroveň frekvenčního šumu je vyšší než - 60 dB, úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí jsou nižší než - 50 dB; úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru jsou nižší než - 50 dB. V porovnání s předchozím hodnocením nezjištěny odchylky. Pokud v předchozím hodnocení došlo k výraznějšímu nárůstu hodnot sledovaných frekvenčních pásem o 15 dB a v aktuálním hodnocení nedošlo k odchýlkám, mění se hodnocení zařízení z C na B.	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, úrovně hodnocených frekvenčních pásem nemají vliv na provozuschopnost zařízení.
C USPOKOJIVÝ	Úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 50 dB, ale nižší než - 40 dB; úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 50 dB, ale nižší než - 40 dB. V porovnání s předchozím hodnocením zjištěny nárůsty hodnot sledovaných frekvenčních pásem o 15 dB.	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, nutné však sledovat vývoj hodnocených frekvenčních pásem.
D NEUSPOKOJIVÝ	Úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 40 dB, ale nižší než - 30 dB; úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 40 dB, ale nižší než - 30 dB.	Zařízení schopno provozu pouze v omezeném rozsahu, pro zjištění příčiny závady nutnost provedení dalších diagnostických kontrol.
E NEVYHOVUJÍCÍ	Úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení stavu rotorových tyčí je rovna nebo vyšší než - 30 dB; úroveň charakteristických frekvencí pro hodnocení excentricity a ustavení motoru je rovna nebo vyšší než - 30 dB.	Stav zařízení neslučitelný s provozem ani v omezeném rozsahu, hrozí trvalé poškození zařízení.

Hodnocení jednotlivých analyzovaných motorů a jejich technický stav za období **VYPLNIT** je uveden v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2 Přehled aktuálních stavů analyzovaných asynchronních motorů

SJZ	V. č. motoru	Hodnocení zařízení	Stav zařízení
VYPLNIT	VYPLNIT	A	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení.
VYPLNIT	VYPLNIT	B	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, úrovně hodnocených frekvenčních pásem nemají vliv na provozuschopnost zařízení.
VYPLNIT	VYPLNIT	C	Zařízení schopno dlouhodobého provozu bez omezení, nutné však sledovat vývoj hodnocených frekvenčních pásem.
VYPLNIT	VYPLNIT	D	Zařízení schopno provozu pouze v omezeném rozsahu, pro zjištění příčiny závady nutnost provedení dalších diagnostických kontrol.
VYPLNIT	VYPLNIT	E	Stav zařízení neslučitelný s provozem ani v omezeném rozsahu, hrozí trvalé poškození zařízení.

7.1 Doporučení

Zde uveďte doporučení pro následný postup údržby motorů, které spadají do kategorie C, D a E.